



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Antti Niemelä

Sähkön kysyntäjousto Porvoon jalostamolla

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 27.5.2018

Valvoja: Professori Mika Järvinen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Harri Salmio

Tekijä Antti Niemelä

Työn nimi Sähkön kysyntäjousto Porvoon jalostamolla

Maisteriohjelma Master's Programme in Energy Technology

Koodi ENG21

Työn valvoja Professori Mika Järvinen

Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Harri Salmio

Päivämäärä 27.5.2018

Sivumäärä 77+1

Kieli suomi

Tiivistelmä

Työssä selvitetään Neste Oyj:n Suomen Porvoon jalostamon mahdollisuuksia osallistua sähkön kysyntäjoustoön taloudellisesti kannattavasti aiheuttamatta haittaa jalostamon ydinprosessille eli öljynjalostukselle. Kysyntäjoustolla on mahdollista ylläpitää joustavasti sähkön kysynnän ja tarjonnan välistä tasapainoa ja sitä kautta sähköverkon taajuutta siinäkin tilanteessa, että energiajärjestelmässä merkittävästi lisätään joustamattontaa uusiutuvan energian tuotantoa. Kysyntäjoustolla voidaan lisäksi taata sähkön riittävyys huippukysynnän aikaan, laskea keskimääräisiä energian tuotantokustannuksia ja pienentää verkkokapasiteetin lisäämisen tarvetta. Työn teoriaosassa analysoidaan pohjoismaisia sähkömarkkinoita ja kysyntäjoustopon markkinapaikkoja kuten Fingridin reservi- ja säätösähkömarkkinoita, Suomen tasehallintaa ja Nesteen omaa sähkönkulutusta ja sähkölaitteita.

Fingridin kysyntäjoustoponmarkkinoille osallistuminen vaatii sähkölaitteelta hyvää säädettävyyttä, suurehkoa tehoa ja nopeaa aktivoitumisvastetta, jotta markkinapaikan vaatimukset saadaan täytettyä. Lisäksi Porvoon jalostamolla on tärkeää, ettei laitteen säätäminen aiheuta haittaa prosessille, mikä rajaa merkittävästi potentiaalisia joustokohteita, vaikka erilaisia pumppuja ja kompressoreita on jalostamolla yli 2 000. Tämän takia työn soveltavassa osassa keskitytään analysoimaan säiliöalueen pohjaöljyketjun varastosäiliöiden sähkölämmittimiä. Muut jalostamon kysyntäjoustoponmahdollisuudet analysoidaan lyhyesti.

Pohjaöljysäiliön T47 uppokuumentimen potentiaalia ja soveltumista Fingridin teknisesti haastavalle taajuusohjatun käyttöreservin markkinalle tutkittiin laskemalla lämpöresistanssimenetelmällä säiliön lämpöhäviöt ja rakentamalla historiadataan pohjautuen malli, jolla pystytään ennustamaan pohjaöljyn lämpötilamuutoksia eri tilanteissa. Työn johtopäätöksenä todettiin, että uppokuumentimen automaattinen säätö taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla sähköverkon taajuuden funktiona on teknisesti ja prosessin suhteen mahdollista toteuttaa eikä säätö aiheuta laitteelle teknistä kulumista. Investointi säiliöalueen pohjaöljysäiliöiden liittämistä taajuusohjattuun käyttöreserviin todettiin työssä taloudellisesti kannattavaksi. Jatkossa on myös mahdollista lisätä reservin joustokapasiteettia esimerkiksi hyödyntämällä pohjaöljyketjuun liittyviä jakeluterminaalin sähkölämmittimiä.

Avainsanat kysyntäjousto, Fingrid, sähkömarkkinat, reservisähkö, säätösähkö, FCR-N



Author Antti Niemelä

Title of thesis Demand response at Porvoo refinery

Master programme Master's Programme in Energy Technology

Code ENG21

Thesis supervisor Professor Mika Järvinen

Thesis advisor Harri Salmio M.Sc.

Date 27.05.2018

Number of pages 77+1

Language Finnish

Abstract

The possibilities to use demand response of electricity at Neste Corporation's oil refinery in Porvoo are studied in this thesis taking into account economical side and the relevant refining process. Demand response is a flexible way to balance the supply and demand and also the electricity frequency in the grid even if inflexible renewable energy production increases in the energy system. Demand response can also be used to secure electricity supply in peak demands, decrease average energy production costs and the investment costs required in the electricity grid. In the literature section of the thesis Nordic electricity and demand response markets for example Fingrid's reserve and balancing energy markets, Finnish balance model and the electricity usage and devices at the refinery are analyzed.

It requires good adjustability, quite big capacity and fast activation time from the electrical device in order to meet the requirements of Fingrid's demand response markets. In addition it is important that adjusting devices won't affect the main process, which limits the potential demand response resources a lot, even though there are over 2 000 pumps and compressors at the refinery. Because of this, in the applied part of the thesis the focus in the analysis is in the vacuum residue chain at the tank farm and the electrical heaters of different vacuum residue tanks. Other possible demand response resources at the refinery are analyzed shortly.

The potential of electrical heater of T47 vacuum residue tank and its suitability to Fingrid's technically challenging Frequency Containment Reserve for Normal Operation (FCR-N) was studied by calculating heat losses of the tank with thermal resistance method and building a model based on history data, which can be used to predict the changes in the temperature of vacuum residue in the tank in different circumstances. As a conclusion, it was discovered that the automatic adjustment of heater's power in the FCR-N market by following the frequency of the grid is technically feasible. Also the adjustment won't harm the process or the device if done properly. The investment of adding tank farm's vacuum residue tanks to the FCR-N market was found profitable. In the future it is also possible to add more resources to the FCR-N reserve by utilizing distribution terminal's electrical heaters that are also part of the vacuum residue chain.

Keywords demand response, Fingrid, electricity markets, reserve and balancing energy, FCR-N

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Neste Oyj:n Öljytuotteiden Käyttöhyödykkeet ja Energiatehokkuusosastolle 1.11.2017–30.4.2018 välisenä aikana.

Jo useamman kesän ajan Nesteellä työskennelleenä olin onnekas, että yrityksen sisältä löytyi myös koulutustani vastaava ja erittäin mielenkiintoinen diplomityöpaikka. Nesteen Käyttöhyödykkeet ja Energiatehokkuusosasto tekee päivittäin hienoa työtä mm. jalostamon energiatehokkuuden ja toiminnan yleisen kehittämisen eteen ja siten myös työlleni asetettiin alusta asti korkeat tavoitteet. Työn tarkoituksena oli selvittää Porvoon jalostamon mahdollisuuksia osallistua sähkön kysyntäjoustomarkkinoille taloudellisesti kannattavasti ja samalla edistää uusiutuvan energian tuotannon lisäämistä energiajärjestelmässä. Jalostamon suuren koon, monimutkaisten prosessien ja lukuisten eri sähkölaitteiden takia työ alkoi selvitystyönä, mutta muotoutui loppua kohti ehdotukseksi investoinnista ja käytännön toimintamallista kysyntäjoustomarkkinoille liittymiseksi. Aihe oli haastava ja matkan varrella eteen tullessiin kysymyksiin sai aina apua lukuisilta eri Nesteen työntekijöiltä ja kysyntäjoustomarkkinoihin liittyen myös Fingridin työntekijöiltä.

Erityiskiitokset diplomityöhön osallistumisesta haluan sanoa ohjaajalleni Harri Salmille, Niko Mannerille ja muille käyttöhyödykkeet ja energiatehokkuusosaston asiantuntijoille. Ilman tukeanne, innostustanne, positiivisuuttanne, mielipiteitänne ja asiantuntemustanne ei työn tekeminen olisi ollut läheskään yhtä mielekästä ja merkityksellistä kuin mitä se oli. Lisäksi haluan kiittää työn valvojaa professori Mika Järvistä hyvistä neuvoista ja ideoista työn edetessä.

Ei parane myöskään unohtaa sitä vankumatonta tukea, jota olen aina saanut rakkaalta vaimoltani ja perheeltäni niin diplomityön kuin koko opiskelujeni ajan, ja Espoon ja Oulun opiskelukavereitani, jotka tekivät opiskeluajoista kaiken sen uurastuksen arvoista.

Espoo 27.5.2018

Antti Niemelä

Antti Niemelä

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Merkinnät

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Yleistä sähkömarkkinoista ja kysyntäjoustosta	1
1.2	Fingrid Oyj:n rooli Suomen sähkömarkkinoilla	4
1.3	Työn tavoitteet ja rajaus	4
2	Neste ja Suomen jalostamo Porvoossa	5
2.1	Neste Oyj	5
2.2	Suomen jalostamo Porvoossa	6
2.3	Säiliöalue osana jalostamoa	7
2.4	Sähkönhankinta ja -kulutus Nesteellä	7
2.4.1	Sähkönkulutus alueittain	7
2.4.2	Sähkönkulutus laiteatasolla	11
3	Tasehallinta Suomessa	13
3.1	Taseselvitys	13
3.2	Kahden taseen malli	14
3.3	Reservikustannusten kattaminen	16
4	Sähkömarkkinoiden rakenne ja kysyntäjoustop markkinapaikat	17
4.1	Nord Poolin Elspot- ja Elbas-markkinat	17
4.2	Sähkön johdannaismarkkinat	20
4.3	Reservi- ja säätösähkömarkkinat	20
4.3.1	Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)	22
4.3.2	Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)	23
4.3.3	Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR)	25
4.3.4	Säätösähkömarkkinat (mFRR)	25
4.3.5	Nopea häiriöreservi ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)	27
4.3.6	Tehoreservi	27
4.4	Yhteenveto kysyntäjoustop markkinapaikoista	28
5	Säiliöalueen sähkölämmittimet	31
5.1	Yleistä säiliöalueen pohjaöljysäiliöistä T45-T51	31
5.2	Säiliöiden T45-T49 sähkölämmittimien säätö	33
5.3	Uudet pohjaöljyketjun ajomallit	33
6	Case: Pohjaöljysäiliö T47 ja taajuusohjattu käyttöreservi	34
6.1	Lämpöhäviölaskelmat säiliölle T47	34
6.1.1	Lämpöhäviölaskelmien lähtötiedot	35
6.1.2	Säiliön energiatase tasapainotilanteessa	36
6.1.3	Säiliön vaipan lämpöhäviöt	37
6.1.4	Säiliön pohjan lämpöhäviöt	40
6.1.5	Säiliön katon lämpöhäviöt	41
6.1.6	Säiliön uppokuumentimen ja sekoittajan vaikutus energiataseeseen	42
6.1.7	Yhteenveto säiliön lämpöhäviöistä mitoitustilanteessa ja lämpötilajakaumat rakenteiden yli	44

6.2	Historiadataan pohjautuva malli säiliön T47 lämpötiloista ja lämpötilan muutosnopeuksista.....	46
6.3	Taajuusohjatun käyttöreservin (FCR-N) tuottopotentialiaali.....	49
6.3.1	FCR-N yhteenveto 2013–2017	49
6.3.2	Säiliön T47 FCR-N- ja yösähköanalyysi vuodelta 2017	51
6.4	Investointilaskelma säiliön T47 liittämistä taajuusohjattuun käyttöreserviin (FCR-N).....	55
6.4.1	Vaaditut järjestelmämuutokset ja investoinnit.....	55
6.4.2	Investoinnin kannattavuus ja diskontattu takaisinmaksuaika	58
6.4.3	Mahdollinen käytännön toimintamalli kysyntäjoustop hyödyntämisessä ja siihen liittyvät haasteet.....	59
7	Muita kysyntäjoustopmahdollisuuksia Porvoon jalostamolla	62
7.1	Sähkösaatot, pumput, kompressorit ja säiliösekoittajat	62
7.2	Mustijoen pumput	63
7.3	Jakeluterminaalien säiliöiden B1-B4 sähkölämmittimet	63
7.4	Höyryturbiinipumput.....	63
8	Johtopäätökset.....	65
	Lähdeluettelo	66
	Liiteluettelo	
	Liitteet	

Liite 1. Kysyntäjoustop markkinapaikat 1 s

Merkinnät

A_k	[m ²]	säiliön katon pinta-ala
A_{pohja}	[m ²]	säiliön pohjan pinta-ala
$C_{\text{FCR-N}}$	[MW]	ylläpidetty taajuusohjatun käyttöreservin määrä tarkastellulla ajanhetkellä
C_{katto}	[J/K]	säiliön katon lämpökapasiteetti
C_{kok}	[J/K]	säiliön kokonaislämpökapasiteetti
C_{N_2}	[J/K]	typen lämpökapasiteetti säiliössä
$C_{\text{pö}}$	[J/K]	pohjaöljyn lämpökapasiteetti säiliössä
$C_{\text{säätökoemäärä}}$	[MW]	säätökokein todennettu reservimäärä
C_{vaippa}	[J/K]	säiliön vaipan lämpökapasiteetti
E_{reservi}	[kWh]	taajuusohjatun käyttöreservin reservisähkö, 1 kWh = 3,6 MJ
G_{katto}	[W/K]	säiliön katon lämpökonduktanssi
G_{kok}	[W/K]	säiliön lämpökonduktanssien summa
G_{N_2}	[W/K]	säiliön vaipan typpiosan lämpökonduktanssi
G_{pohja}	[W/K]	säiliön pohjan lämpökonduktanssi
$G_{\text{sekoittaja}}$	[W/K]	säiliösekoittajan lämpökonduktanssi
G_{uk}	[W/K]	säiliön uppokuumentimen lämpökonduktanssi
$G_{\text{vaippa,pö}}$	[W/K]	säiliön vaipan pohjaöljyosan lämpökonduktanssi
H_{N_2}	[m]	typpiosan korkeus säiliössä
$H_{\text{pö}}$	[m]	pohjaöljyn pinnankorkeus säiliössä
I_{uk}	[A]	uppokuumentimen sähkövirta
L	[m]	säiliön vaipan korkeus
P	[MW]	joustokohteen tehonkulutus tarkastellulla ajanhetkellä
$P_{\text{a,sekoittaja}}$	[W]	sekoittajan akseliteho
P_{max}	[MW]	joustokohteen maksimiteho
P_{min}	[MW]	joustokohteen minimiteho
$P_{\text{sekoittaja}}$	[W]	sekoittajan pätöteho
P_{uk}	[W]	uppokuumentimen pätöteho
R_i	[K/W]	materiaalin tai rajapinnan i lämpöresistanssi
$T_{\infty,1}$	[K]	säiliön sisälämpötila
$T_{\infty,4}$	[K]	ympäristön lämpötila
$T_{\text{ka,ulko}}$	[K]	ulkoilman keskimääräinen lämpötila tarkastellulla ajanjaksolla
T_{maa}	[K]	säiliön alapuolisen maan lämpötila
$T_{\text{maa,kuukausi}}$	[K]	säiliön alapuolisen maan kuukausittainen keskilämpötila
$T_{\text{maa,vuosi}}$	[K]	säiliön alapuolisen maan vuotuinen keskilämpötila
T_{N_2}	[K]	typen lämpötila säiliössä
$T_{\text{pö}}$	[K]	pohjaöljyn lämpötila säiliössä
$T_{\text{pö,0}}$	[K]	pohjaöljyn lämpötila tarkastelujakson alussa
$T_{\text{sisä}}$	[K]	säiliön sisälämpötila
$T_{\text{u,vuosi}}$	[K]	ulkoilman vuotuinen keskilämpötila
T_{ulko}	[K]	säiliötä ympäröivän ulkoilman lämpötila
$T_{\text{ulkopinta}}$	[K]	säiliön ulkopinnan lämpötila
U	[W/m ² K]	lämmönläpäisykerroin rakennusosan läpi
U_{uk}	[V]	uppokuumentimen jännite
V_i	[m ³]	aineen/materiaalin i tilavuus
$V_{\text{pö}}$	[m ³]	pohjaöljyn tilavuus

$c_{p,i}$	[J/kgK]	aineen/materiaalin i ominaislämpökapasiteetti
$c_{p,N2}$	[kJ/kgK]	typen ominaislämpökapasiteetti
$c_{p,pö}$	[kJ/kgK]	pohjaöljyn ominaislämpökapasiteetti
h	[m]	säiliön katon korkeus mitattuna vaipan yläreunasta
h_1	[W/m ² K]	säiliön sisäpinnan lämmönsiirtokerroin
h_2	[W/m ² K]	säiliön ulkopinnan lämmönsiirtokerroin
h_{kok}	[W/m ² K]	kokonaislämmönsiirtokerroin säiliön ulkopinnalla
h_{N2}	[W/m ² K]	lämmönsiirtokerroin typen ja säiliön sisäpinnan välillä
$h_{pö}$	[W/m ² K]	lämmönsiirtokerroin pohjaöljyn ja säiliön sisäpinnan välillä
$h_{u,konvektio}$	[W/m ² K]	säiliön ulkopinnan ja ilman välinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin
i	[%]	investoinnilta vaadittu tuottokorko
k		reservisähkön laskemisessa käytetty korjauskerroin
r	[m]	säiliön katon muodostaman pallon säde
r_1	[m]	säiliön sisäsäde
r_{Fe1}	[m]	säiliön keskipisteen etäisyys teräslevyn ulkoreunasta
r_{Fe2}	[m]	säiliön keskipisteen etäisyys pintapellin ulkoreunasta
r_n	[m]	säiliön keskipisteen etäisyys materiaalin n ulkoreunasta
r_{PVC}	[m]	säiliön keskipisteen etäisyys säiliön ulkoreunasta
$r_{sisä}$	[m]	säiliön keskipisteen etäisyys säiliön vaipan sisäreunaan
r_{villa}	[m]	säiliön keskipisteen etäisyys kivivillan ulkoreunasta
S_{Fe}	[m]	säiliön teräslevyn tai pellin paksuus
S_{Fe1}	[m]	teräslevyn paksuus säiliön katossa
S_{Fe2}	[m]	pintapellin paksuus säiliön katossa
S_{PVC}	[m]	säiliön pintapellin PVC-pinnoitteen paksuus
$S_{vaippa,villa}$	[m]	säiliön vaipan kivivillan paksuus
S_{villa}	[m]	kivivillan paksuus säiliön katossa
t	[s]	tarkastelujakson pituus
$\Delta Q_{pö}$	[J]	pohjaöljyn energiamäärän muutos
ΔT	[K]	säiliön sisä- ja ulkolämpötilan ero
Δt	[s]	tarkastellun aikavälin pituus tai aikapoikkeaman muutos tarkastellulla tunnilla
ΔT_i	[K]	lämpötilaero materiaalin i yli
$\Delta T_{pö}$	[K]	pohjaöljyn lämpötilamuutos tarkastellulla ajanjaksolla
ΔT_{ulko}	[K]	lämpötilaero säiliön ulkopinnan ja ympäröivän ulkoilman välillä
ΔT_{villa}	[K]	lämpötilaero kivivillan yli vaipan kaasuosassa
$\Delta T_{maa,kuukausi}$	[K]	säiliön alapuolisen maan kuukausittaisen ja vuotuisen keskilämpötilan ero
$\Delta T_{maa,vuosi}$	[K]	alapohjan alapuolisen maan ja ulkoilman vuotuisen keskilämpötilan ero
$\sum R$	[kW]	toteutunut yhteenlaskettu taajuusohjatun käyttöreservin määrä
ϵ_{PVC}		säiliön PVC-pinnoitetun sinkityn pintapellin emissiivisyys
η		sekoittajan sähkömoottorin hyötysuhde
λ_{Fe}	[W/mK]	raudan lämmönjohtavuus
λ_n	[W/mK]	materiaalin n lämmönjohtavuus
λ_{villa}	[W/mK]	kivivillan lämmönjohtavuus
ρ_i	[kg/m ³]	aineen/materiaalin i tiheys
ρ_{N2}	[kg/m ³]	typen tiheys
$\rho_{pö}$	[kg/m ³]	pohjaöljyn tiheys

$\rho_{\text{vaippa,villa}}$	[kg/m ³]	säiliön vaipan kivivillan tiheys
σ	[W/m ² K ⁴]	Stefan-Boltzmannin vakio
τ	[s]	terminen aikavakio
$\phi_{\text{häviöt}}$	[W]	säiliön lämpöhäviöt
ϕ_i	[W]	lämpövirta rakenteen i yli
ϕ_{katto}	[W]	lämpövirta säiliön katon läpi
ϕ_{pohja}	[W]	lämpövirta säiliön pohjan läpi
ϕ_r	[W]	lämpövirta sylinterimuotoisen vaipan läpi
$\phi_{\text{ulkopinta}}$	[W]	lämpövirta säiliön ulkopinnasta ympäristöön
ϕ_{vaippa}	[W]	lämpövirta säiliön vaipan läpi
$\phi_{\text{vaippa,N}_2}$	[W]	lämpövirta säiliön vaipan kaasuosan läpi
$\phi_{\text{vaippa,pö}}$	[W]	lämpövirta säiliön vaipan pohjaöljyosan läpi

Lyhenteet

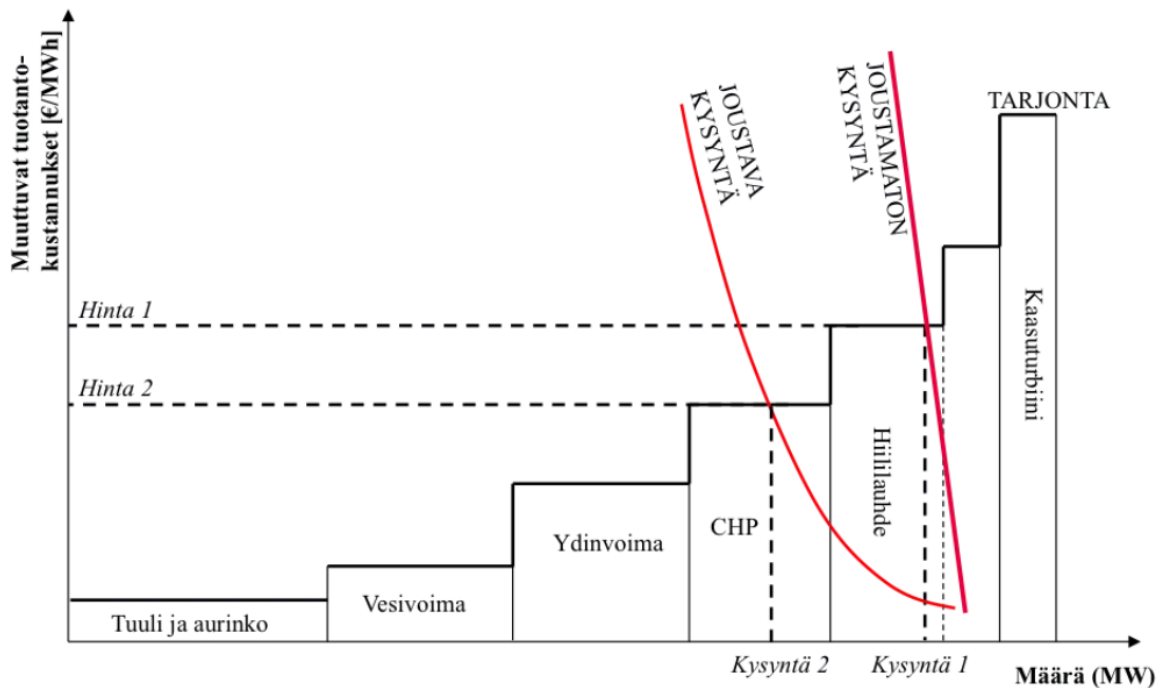
CHP	Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto
DAO	Deasfaltoitu öljy
EDI	Electronic Data Interchange
EHJÄ	Nesteen energiahallintajärjestelmä
Elspot-FIN	Nord Poolin Suomen hinta-alueen sähkön hinta
EPAD	Electricity Price Area Difference
EU	Euroopan Unioni
FCR-D	Frequency Containment Reserve for Disturbances, taajuusohjattu häiriöreservi
FCR-N	Frequency Containment Reserve for Normal operation, taajuusohjattu käyttöreservi
GW	gigawatti
MW	megawatti
MVA	megavolttiamppeeri
MWh	megawattitunti
NExBTL	Neste uusiutuva dieselpolttoaine
NLI	Naantali
OHASF	Ohennettu asfalteeni
OTC	Over The Counter, kaupankäynti pörssin ulkopuolella
PVO	Porvoo
REM	Real Estate Management
SDA	Solvent deasphalting, pohjaöljyn esikäsittely-yksikkö
SLÖ	Säiliöalue
TL1	Tuotantolinja 1
TL2	Tuotantolinja 2
TL3	Tuotantolinja 3
TL4	Tuotantolinja 4
TL5	Tuotantolinja 5
TLY	Tuotantolinja ympäristö
TOP	Tietokoneohjaus prosessille -järjestelmä
TTÖP	Tyhjötislauksen pohjaöljy
TWh	terawattitunti
UPS	Uninterruptable Power Supply, keskeytymätön virransyöttö
a	vuosi
aFRR	automatic Frequency Restoration Reserve, automaattinen taajuudenhallintareservi
kk	kuukausi
kW	kilowatti
mA	milliampeeri
mFRR	manual Frequency Restoration Reserve, manuaalinen taajuuden palautusreservi
mm	millimetri
vrk	vuorokausi

1 Johdanto

1.1 Yleistä sähkömarkkinoista ja kysyntäjoustosta

Sähköjärjestelmässä sähköä on tuotettava ja kulutettava joka hetki yhtä paljon. Kysynnän ja tarjonnan hetkellinen tasapaino näkyy sähköverkon taajuudessa, jonka normaali taajuus Suomessa on 50 Hz. Jos sähkönkulutus on tuotantoa suurempi, lähtee verkon taajuus laskemaan. Vastaavasti, jos sähkön tuotanto on kysyntää suurempaa, lähtee verkon taajuus nousemaan. Perinteisesti energiajärjestelmän tehotasapainoa on ylläpidetty tuotantoa säätämällä esimerkiksi vesivoima- ja lauhdelaitoksissa. Kuitenkin ilmastomuutoksen torjumisen ja erilaisten poliittisten päätösten takia uusiutuvan energian tuotantoa kuten tuuli- ja aurinkosähköä lisätään Suomessa jatkuvasti. Myös tasaisesti ajettavan ydinvoiman tuotantoa lisätään merkittävästi, mikä aiheuttaa haasteita energiajärjestelmälle sääriippuvaisen uusiutuvan tuotannon kanssa. Tehotasapainon ylläpitäminen on haastavampaa, kun tuotantoa ei voida tai ei taloudellisesti kannata säätää. Suuren voimalaitosyksikön irrotessa verkosta häiriötilanteessa taajuuden laskunopeuden määrää sähköjärjestelmän inertia eli liike-energia. NykYTEKNIKALLA toteutettuna aurinko- ja tuulisähkö eivät tarjoa järjestelmään perinteisiä tuotantokoneistoja vastaavaa inertiaa, mikä johtaa järjestelmän häiriötilanteissa suurempiin taajuuden pudotuksiin ennen kuin reservit alkavat palauttaa taajuutta normaalialueelle [1]. Näiden syiden takia tarvitaan entistä enemmän tehotasapainon hallintaan osallistuvaa säätökapasiteettia, kysyntäjoustoa sekä erilaisia energiavarastoja. Kysyntäjousto auttaa siis osaltaan ylläpitämään energiajärjestelmän luotettavuutta sekä edistää uusiutuvan energian tuotannon markkinoille saamista. [2, 3, 4]

Kaikille markkinaosapuolille yhteinen sähkön hinta määräytyy tukkumarkkinoilla joka tunnille kysynnän ja tarjonnan mukaan kysyntä- ja tarjontakäyrien leikkauspisteessä. Kysynnän kasvaessa myös sähkön hinta kasvaa kuvan 1 mukaisesti. Eri energiantuotantomuodoilla on erisuuruiset muuttuvat tuotantokustannukset, joten tarjontakäyrä seuraa eri tuotantomuotoja halvimhasta kalleimpaan. Joka tunnille sähkön hinta määräytyy korkeimman hyväksytyn tarjouksen marginaalihinnan mukaan. Esimerkiksi kylmänä talvipäivänä valtakunnallinen sähkön kysyntä ja hinta kasvavat selvästi, kun käytössä on paljon päästöjä aiheuttavia energiantuotantomuotoja. Kuvan 1 mukaisesti kysyntäjoustolla on mahdollista saada tuotanto vähäpäästöisemmäksi, jos esimerkiksi CHP-tuotanto (Combined Heat and Power) riittää vastaamaan sähkön kysyntään eikä hiililauhdetuotantoa tarvita. Samalla myös sähkön markkinahinta laskee kaikilla käyttäjillä. [2]



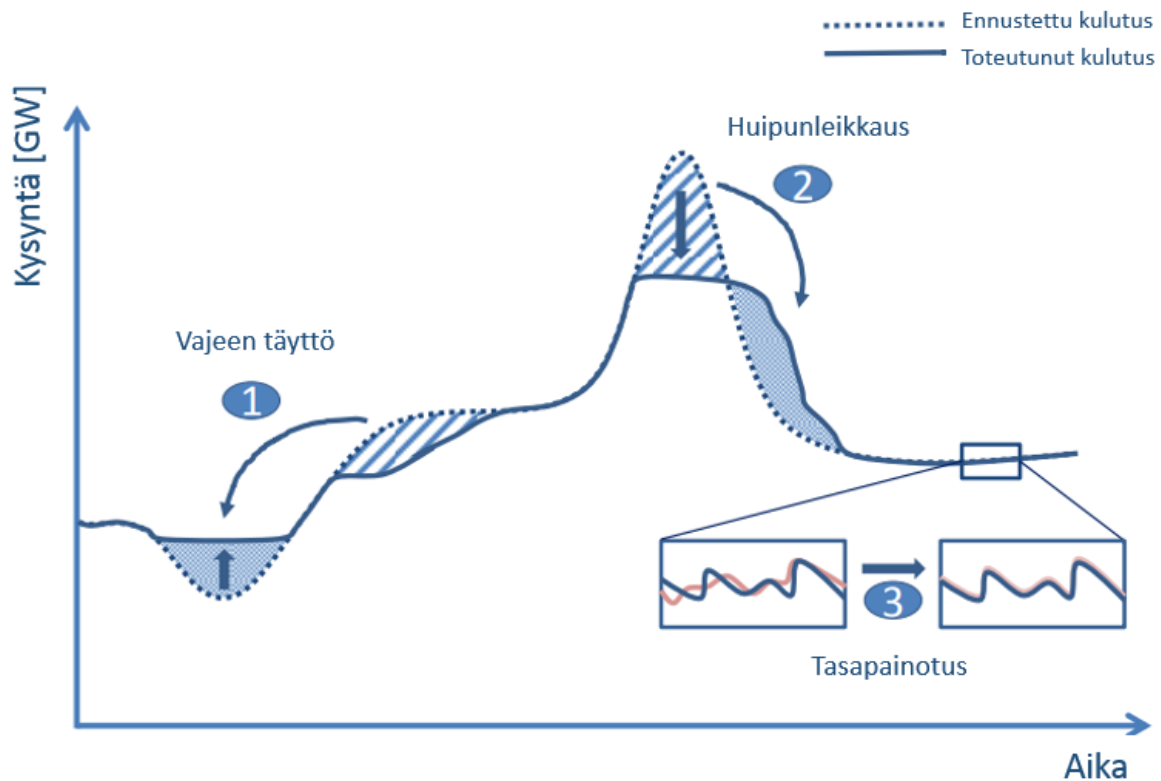
Kuva 1 Sähköenergian tukkumarkkinahinnan muodostuminen [5]

Kysyntäjousto on sähkönkäytön siirtämistä korkean kysynnän ja hinnan tunneilta pienemmän kysynnän ja edullisemman hinnan ajankohtaan tai sähkönkäytön hetkellistä muuttamista tehtasapainon hallitsemiseksi [6]. Sähkönkulutusta voi siirtää edullisemman hinnan ajankohtaan esimerkiksi lataamalla sähköautoja yöaikaan tai seuraamalla aktiivisesti sähkön tunneittaisia hinnanvaihteluja ja vähentää sähkönkäyttöä, kun sähkö on kallista. Jotta esimerkiksi kuluttaja voisi parhaiten hyötyä kysyntäjoustostaan, pitäisi kuluttajalla olla pörsisähköön sidottu tunti hinnoiteltu sähkösopimus. Markkinavetoista kysyntäjoustoa on havainnollistettu kuvassa 2. Kuitenkin, jos sähkön halpa hinta osuu huippukuormitusajankohdaksi, voi kysyntäjousto toisaalta entisestään lisätä verkon huippukuormitusta, mikä lisää verkon huippukulutuskapasiteetin rakentamisen tarvetta. [2, 7, 8]

Kysyntäjoustoteknologioita voidaan tyypillisesti hyödyntää kolmella eri tasolla, joiden vaikutus energiajärjestelmään on suoraan verrannollinen jouston määrään [9]:

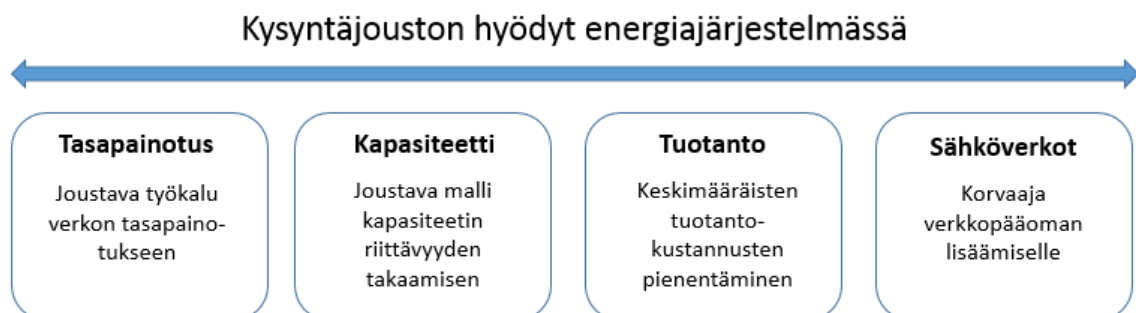
- Teollisella tasolla suuret tuotantolaitokset voivat säätää tuotantoprosessejaan sähkön hinnan mukaan ja siten pienentää energiakustannuksiaan
- Kaupallisella tasolla voidaan tyypillisesti automaation avulla hallita esimerkiksi ilmastointi- ja valojärjestelmiä
- Pienkuluttajat voivat hyödyntää erilaisia älykkäitä laitteita ja automatisoituja ratkaisuja

Sähkömarkkinoilla voivat toimia myös aggregaattorit eli yritykset, jotka muodostavat pienkulutuksesta ja -tuotannosta isomman kokonaisuuden, joka voi osallistua eri markkinapaikoille [6].



Kuva 2 Havainnekuva markkinavetoisesta kysyntäjoustosta, muokattu [10]

Kysyntäjouston hyödyntämistä on edistetty myös poliittisesti EU:n energiatehokkuusdirektiivillä (2012/27/EU 15 artikla kohta 8): ”Jäsenvaltioiden on varmistettava, että kansalliset energia-alan sääntelyviranomaiset rohkaisevat kysyntäpuolen resursseja, kuten kysyntäjoustoa, osallistumaan tarjonnan ohella tukku- ja vähittäismarkkinoille. Jollei verkkojen hallintaan liittyvistä teknisistä rajoitteista muuta johdu, jäsenvaltioiden on edistettävä kysyntäjouston pääsyä ja osallistumista tasapainotus-, varavoima- tai muille järjestelmäpalvelumarkkinoille.” Artiklan päätavoite on edistää energiatehokkuutta, sähkön kysyntäjoustoa ja hajautettua energiantuotantoa. [11] Kysyntäjoustolla on mahdollista saavuttaa monenlaisia hyötyjä. Rahallisen hyödyn ohella se parantaa energiajärjestelmän tehokkuutta pienentämällä huipputuotantoa ja sähköverkon vaatimuksia. Kysyntäjousto mahdollistaa myös uusiutuvien energiantuotantomuotojen lisäämisen järjestelmässä ja on siten hyödyksi ilmastomuutoksen torjunnassa. [12] Sähköntuotannon ja verkon kapasiteetin riittävyyden varmistamisessa ja sähköverkon tasapainotuksessa kysyntäjousto on myös joustava työkalu [13]. Kuvassa 3 on esitettyä kysyntäjouston myönteisiä vaikutuksia energiajärjestelmään.



Kuva 3 Kysyntäjouston positiivisia vaikutuksia koko energiajärjestelmään, muokattu [13]

1.2 Fingrid Oyj:n rooli Suomen sähkömarkkinoilla

Suomen päävoimansiirrossa käytettävän kantaverkon omistaa suomalaisomisteinen Fingrid Oyj (jäljempänä ”Fingrid”). Kantaverkko on maanlaajuinen ja siihen ovat liittyneinä voimalaitokset, tehtaot sekä alueelliset jakeluverkot. Sähköverkkoluvassa Energiavirasto on määrännyt Suomen kantaverkon järjestelmävastaavaksi Fingridin, jonka tehtävänä on ylläpitää sähköjärjestelmä jatkuvasti toimintakykyisenä. Tämä tarkoittaa sitä, että Fingrid huolehtii, että sähköjärjestelmän tuotanto ja kulutus ovat aina yhtä suuret, verkon käyttövarmuus säilyy suunnitellulla ja sovitulla tasolla ja että häiriötilanteet selvitetään nopeasti. Fingrid vastaa myös kantaverkon kehityksestä ja rajasiirtoyhteyksien käytöstä Pohjoismaihin, Viroon ja Venäjälle, mikä mahdollistaa kansainvälisen sähkökaupan. [14, 15]

Sähkönkulutuksessa ja tuotannossa tapahtuu muutoksia sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä, vaikka markkinatoimijoiden vastuulla on etukäteen suunnitella ja tasapainottaa kulutuksensa ja tuotantonsa. Suunnitelmat poikkeavat kuitenkin aina toteutuvasta ja järjestelmävastaavan tehtävänä on kokoajan huolehtia sähkönkulutuksen ja -tuotannon tasapainosta. Kysynnän ja tuotannon heilahtelut näkyvät suoraan poikkeamana sähköverkon normaalitaajuudessa, joka on 50 Hz. Normaaliolosuhteissa taajuuden sallitaan vaihdella 49,90 ja 50,10 Hz:n välillä. Taajuuden poiketessa nimellisarvosta järjestelmävastaava pystyy ylläpitämään tehotasapainoa aktivoimalla säätötarjouksia ylläpitämiltään säätösähkömarkkinoilta ja varuamalla reservejä, jotka ovat tuotantolaitoksen tai kulutusyksikön vapaata säätökykyistä päätötehdokapasiteettia. [3]

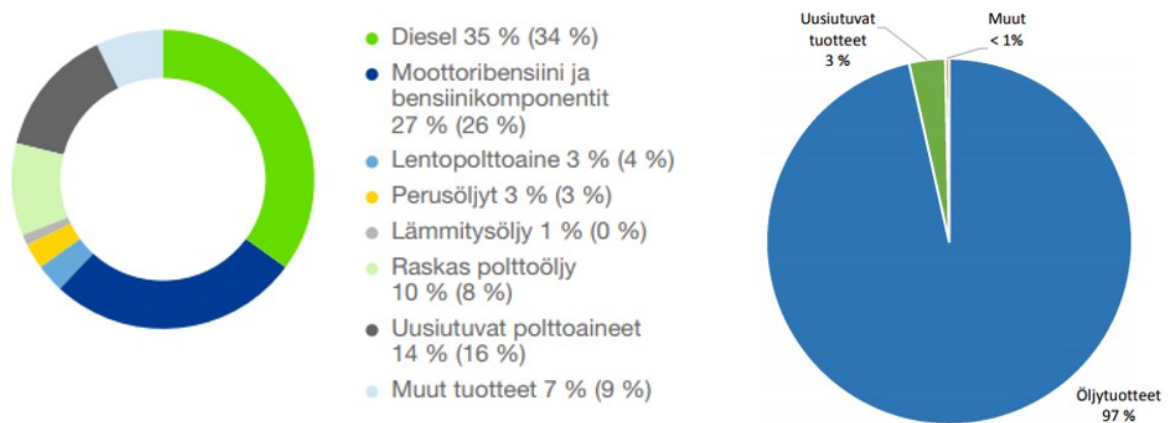
1.3 Työn tavoitteet ja rajaus

Tämän diplomityön tarkoituksena on selvittää sähkön kysyntäjoustop hyödyntämisen mahdollisuudet Nestein jalostamolla Porvoossa pohjautuen Suomen sähkömarkkinoihin. Työssä keskitytään Porvoon säiliöalueen suurimpiin säiliöihin ja niiden sähkölämmittimiin. Lisäksi työssä analysoidaan Nestein Porvoon jalostamon sähkönkulutuksen jakaumia ja sähkölaitteita, minkä pohjalta kartoitetaan ja käsitellään lyhyesti muita potentiaalisia Porvoon jalostamon kysyntäjoustokohteita.

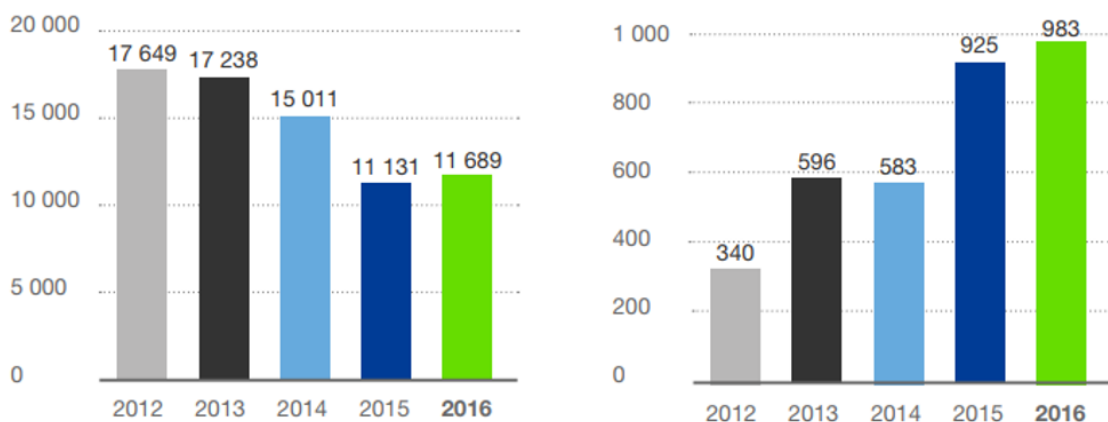
2 Neste ja Suomen jalostamo Porvoossa

2.1 Neste Oyj

Neste Oyj (jäljempänä ”Neste”) on korkealaatuisiin liikennepolttoaineisiin keskittyvä jalostus- ja markkinointiyhtiö. Nesteen liiketoiminta perustuu Nesteen Suomen jalostamoon sekä uusiutuvan dieselpolttoaineen jalostamoihin Singaporessa ja Alankomaiden Rotterdamissa. Suomen jalostamo jalostaa pääasiassa fossiilisia polttoaineita ja se koostuu Porvoon tuotantolinjoista 1-4 ja Naantalin tuotantolinjasta 5. Yhtiö valmistaa kaikkia keskeisimpiä öljytuotteita ja on maailman johtava uusiutuvan dieselpolttoaineen toimittaja. Yhtiöllä on toimintaa 15 maassa ja henkilöstöä maailmanlaajuisesti noin 5 000. Kuvassa 4 on esitetty osuudet tuotelajeittain Nesteen myynnistä ja jalostamoiden kokonaisenergiankulutuksen jakauma vuonna 2016. Huomionarvoista on, että uusiutuvien tuotteiden valmistus Rotterdamissa, Singaporessa ja osittain Porvoossa vie vain 3 % koko energiankulutuksesta ja loput 97 % käytetään öljytuotteiden valmistukseen Porvoossa ja Naantalissa. Kuvassa 5 on esitetty yhtiön liikevaihdon ja vertailukelpoisen liikevoiton kehitys viime vuosina. [16, 17, 18]



Kuva 4 Vasemmalla Nesteen jalostamoiden myynti omasta tuotannosta tuotelajeittain prosentteina vuonna 2016 (suluissa vuoden 2015 osuudet) ja oikealla jalostamoiden energiankulutuksen jakauma vuonna 2016 [18, 19]



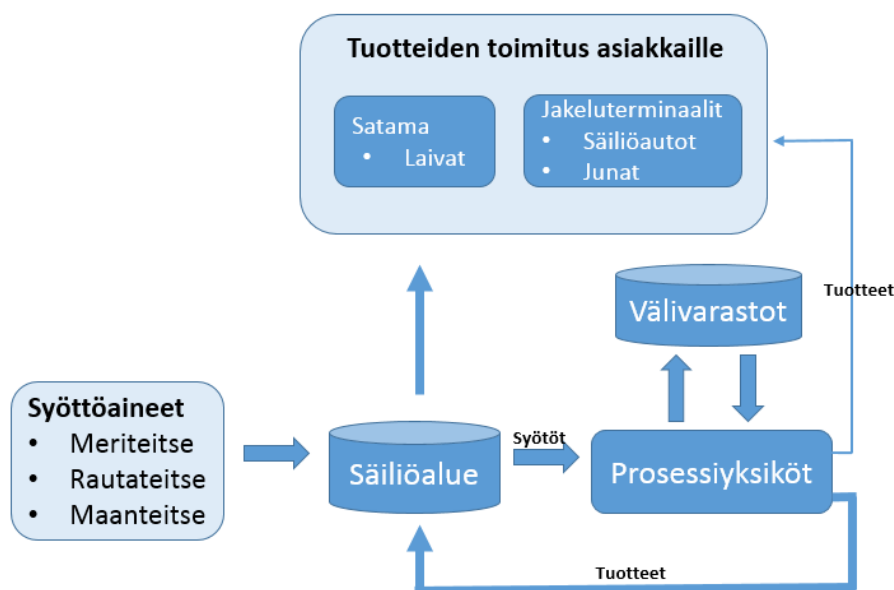
Kuva 5 Nesteen liikevaihto ja vertailukelpoinen liikevoitto vuosina 2012–2016 [18]

2.2 Suomen jalostamo Porvoossa

Nesteen Suomen jalostamo Porvoossa sijaitsee Kilpilahden teollisuusalueella ja se aloitti toimintansa vuonna 1965. Alue on Pohjoismaiden suurin kemian prosessiteollisuuden keskittymä ja yksi Euroopan kehittyneimmistä ja monipuolisimmista jalostamoista. Porvoon jalostamo koostuu neljästä tuotantolinjasta (TL1, TL2, TL3 ja TL4) ja yli 40 prosessiyksiköstä. Viime vuosien aikana Porvoon ja Naantalın jalostamot on asteittain yhdistetty yhdeksi jalostamoksi (One Refinery) tarkoittaen sitä, että eri prosessit liittyvät toisiinsa niin voimakkaasti, että Naantalın jalostamosta on tullut viides tuotantolinja (TL5) [20]. Porvoon jalostamoalueella toimii myös tonnimääräisesti Suomen suurin satama, jalostettujen tuotteiden jakeluterminaalit, voimalaitos ja oma palokunta. Suurin osa raaka-aineista ja jalostetuista öljytuotteista kuljetetaan meriteitse. Sataman kautta liikkuu vuosittain raakaöljyä ja öljytuotteita 20–23 miljoonaa tonnia. Lisäksi raakaöljyn ja öljytuotteiden varastotilaa on 7 miljoonaa kuutiometriä, josta suurin osa sijaitsee jalostamon säiliöalueella. Alueella sijaitsevat myös Nesteen tutkimustoiminnot sekä insinööritoimisto Neste Engineering Solutions (entinen Neste Jacobs). [16, 21, 22]

Porvoon jalostamon tuotanto on noin 12,5 miljoonaa tonnia vuodessa ja raakaöljyn jalostuskapasiteetti on noin 200 000 tynnyriä päivässä. Tuotannosta noin 40 % menee kotimaan markkinoille ja loput 60 % vientinä pääasiassa Pohjoismaihin, Keski-Eurooppaan ja Pohjois-Amerikkaan. Porvoon jalostamon tuotevalikoimaan lukeutuvat dieselpolttoaine, bensiini, Neste uusiutuva dieselpolttoaine (NExBTL), voiteluaineiden valmistuksessa käytettävä perusöljy, lentopetrol, nestekaasut ja kevyt ja raskas polttoöljy. Valmistuksessa on yhteensä yli 150 eri tuotetta ja tuotekomponenttia. [21]

Kuvassa 6 on esitetty yleiskuvaus Porvoon jalostamon jalostusprosessin toiminnasta. Pääpiirteissään prosessi menee niin, että jalostuksessa käytettävät syöttöaineet toimitetaan jalostamon alueelle laivoilla, junilla ja säiliöautoilla ja ne varastoidaan säiliöalueelle, josta ne johdetaan eri prosessiyksiköiden tarpeisiin. Prosessien ja välivarastoinnin kautta suurin osa jalostetuista tuotteista johdetaan varastoon säiliöalueelle ja sieltä sataman ja jakeluterminaalien kautta asiakkaille.



Kuva 6 Yleiskuvaus Porvoon jalostamon toiminnasta, muokattu [23]

2.3 Säiliöalue osana jalostamoa

Säiliöalue on pinta-alaltaan laajin osa Nestein jalostamoa Porvoossa (kuva 7) sillä se on tärkein prosessin syöttöaineiden ja valmiiden tuotteiden varastointipaikka. Säiliöalue koostuu lukuisista erityyppisistä ja -kokoisista säiliöistä.



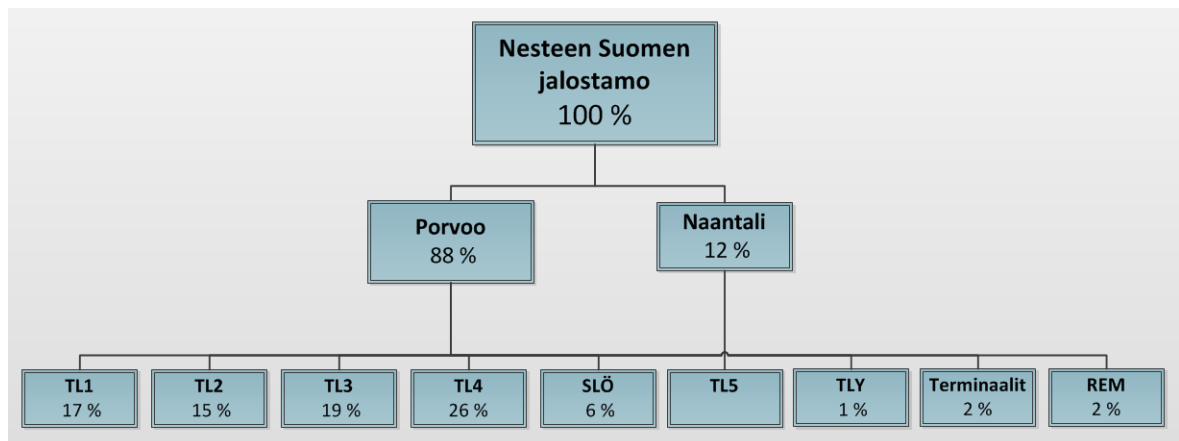
Kuva 7 Karttakuva säiliöalueesta Nestein jalostamolla Porvoossa [24]

2.4 Sähkönhankinta ja -kulutus Nesteellä

Porvoon jalostamon prosessit saavat tarvitsemansa energian pääasiassa polttokaasusta (80 %), höyrynä alueella sijaitsevalta voimalaitokselta (10 %) ja sähköstä (10 %) [25]. Veolia Services Suomi Oy:n operoimalla voimalaitoksella tuotetaan myös sähköä, mutta sen voimalaitoksen omistava Kilpilahden Voimalaitos Oy (KPP) myy yleisille sähkömarkkinoille [26, 27]. KPP:n omistavat Neste Oyj (40 %), Veolia Energie International S.A. (40 %) ja Borealis Polymers Oy (20 %) [28]. Neste ostaa tarvitsemansa sähkön sähkömarkkinoilta ja sähkön siirron hoitaa Aurora Kilpilahti Oy, joka omistaa jalostamon alueella sähköinfrastruktuurin ja sähköverkot. [29] Sähköä kuluttavat paljon esimerkiksi erilaiset pumpput, kompressorit, sähkölämmittimet, puhaltimet, sekoittajat ja sähkösaatot.

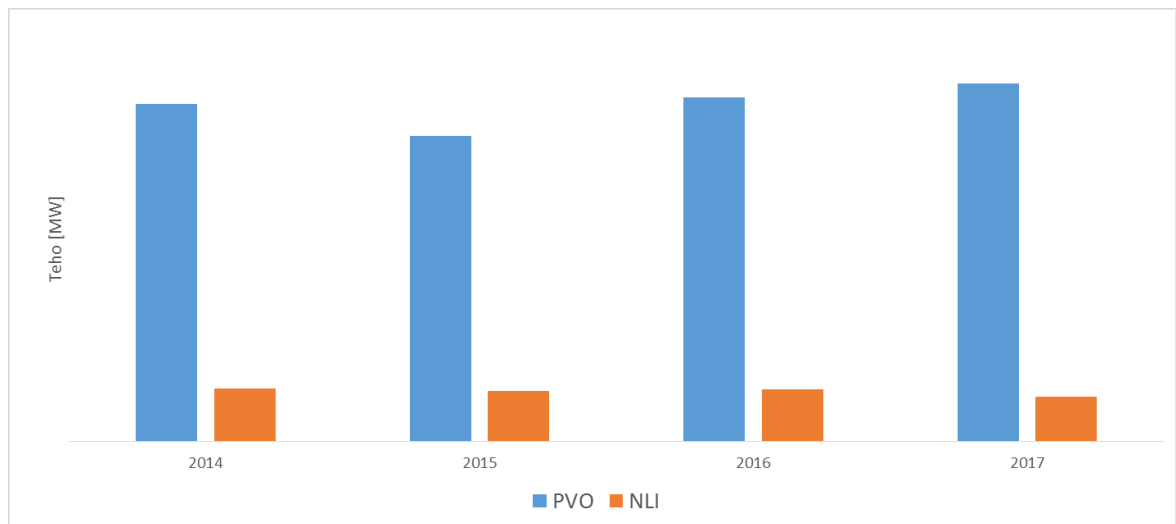
2.4.1 Sähkönkulutus alueittain

Nestein Suomen jalostamon eri osien sähkönkulutuksen prosentuaaliset osuudet vuonna 2017 ovat eroteltuna kuvassa 8. Porvoon keskimääräinen vuosikulutus on ollut noin 88 % ja Naantalin (TL5) keskimääräinen vuosikulutus noin 12 % koko Nestein Suomen jalostamon sähkönkulutuksesta. Suurin sähkönkulutus jalostamolla tapahtuu jalostusprosesseissa eri tuotantolinjoilla, joilla kulutetaan keskimäärin noin 83 % Suomen jalostamon kokonaiskulutuksesta. Säiliöalueen, jakeluterminaalien ja erinäisten kiinteistöjen (REM, Real Estate Management) kulutus on keskimäärin noin 11 % kokonaiskulutuksesta. Säiliöalueen osuus kokonaiskulutuksesta on noin 6 %.

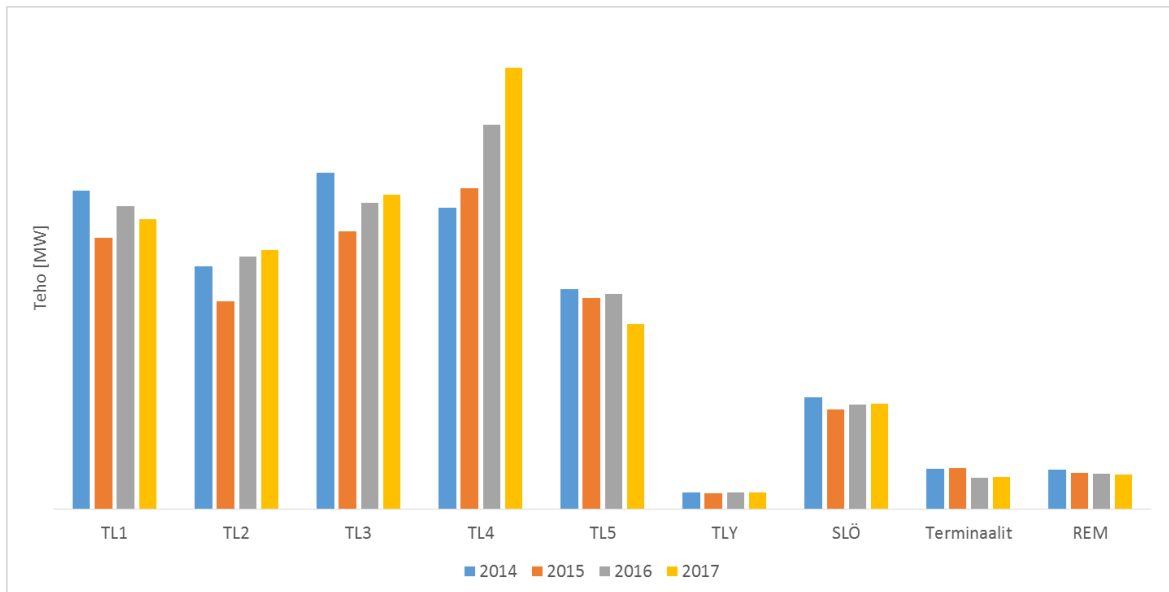


Kuva 8 Nesteen Suomen jalostamon vuoden 2017 alueittaisen sähkönkulutuksen osuudet

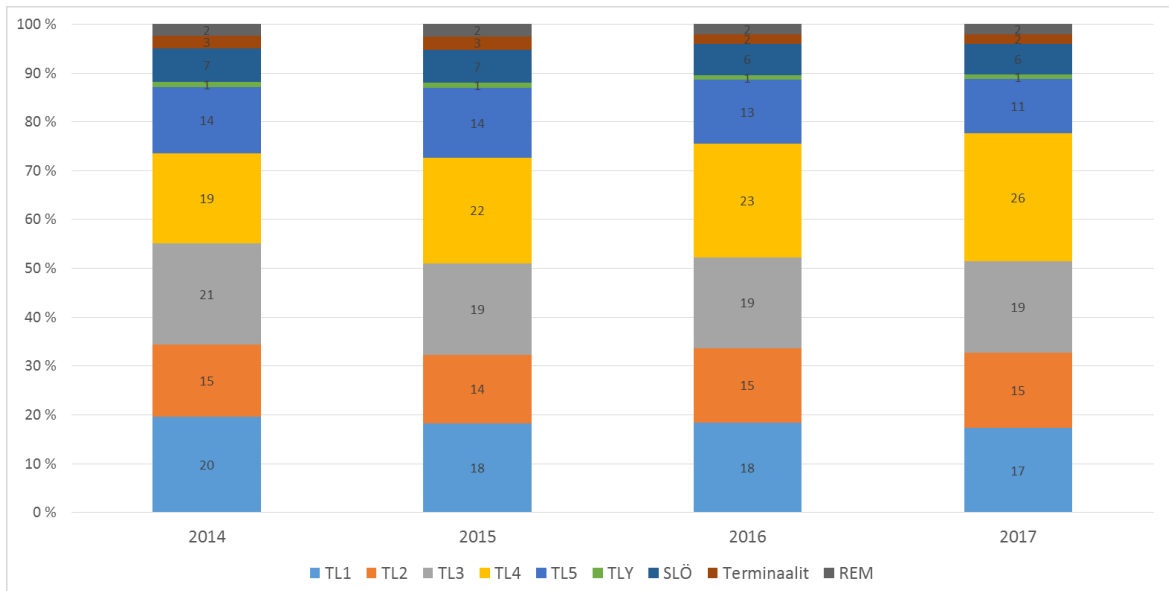
Kuvassa 9 on esitetty Nesteen keskimääräisen sähkönkulutuksen kehitys vuosina 2014–2017. Kulutuksen on havaittu kasvaneen Porvoossa noin 6 %, mikä johtuu käytännössä kasvaneesta kulutuksesta TL4:lla sen käyttöasteen parantuessa ja uuden 200 miljoonaa euroa maksaneen investoinnin raaka-ainesyötön esikäsittely-yksikön (SDA) käyttöönotosta [30]. Vuoden 2015 pienempi sähkönkulutus johtuu pääasiassa vuoden 2015 Porvoon suurseisakista. Kuvassa 10 on esitetty eri alueiden keskimääräisten vuositehojen kehitys vuosina 2014–2017, mistä ilmenee selvästi sähkönkulutuksen kasvu TL4:lla ja TL5:n vuoden 2017 huoltoseisakki. Kuvassa 11 on puolestaan esitetty eri alueiden prosenttiosuudet kokonaisvuosikulutuksesta vuosina 2014–2017.



Kuva 9 Sähkönkulutuksen kehitys Suomen jalostamolla vuosina 2014–2017



Kuva 10 Keskimääräisen sähkönkulutuksen kehitys Suomen jalostamolla alueittain vuosina 2014–2017



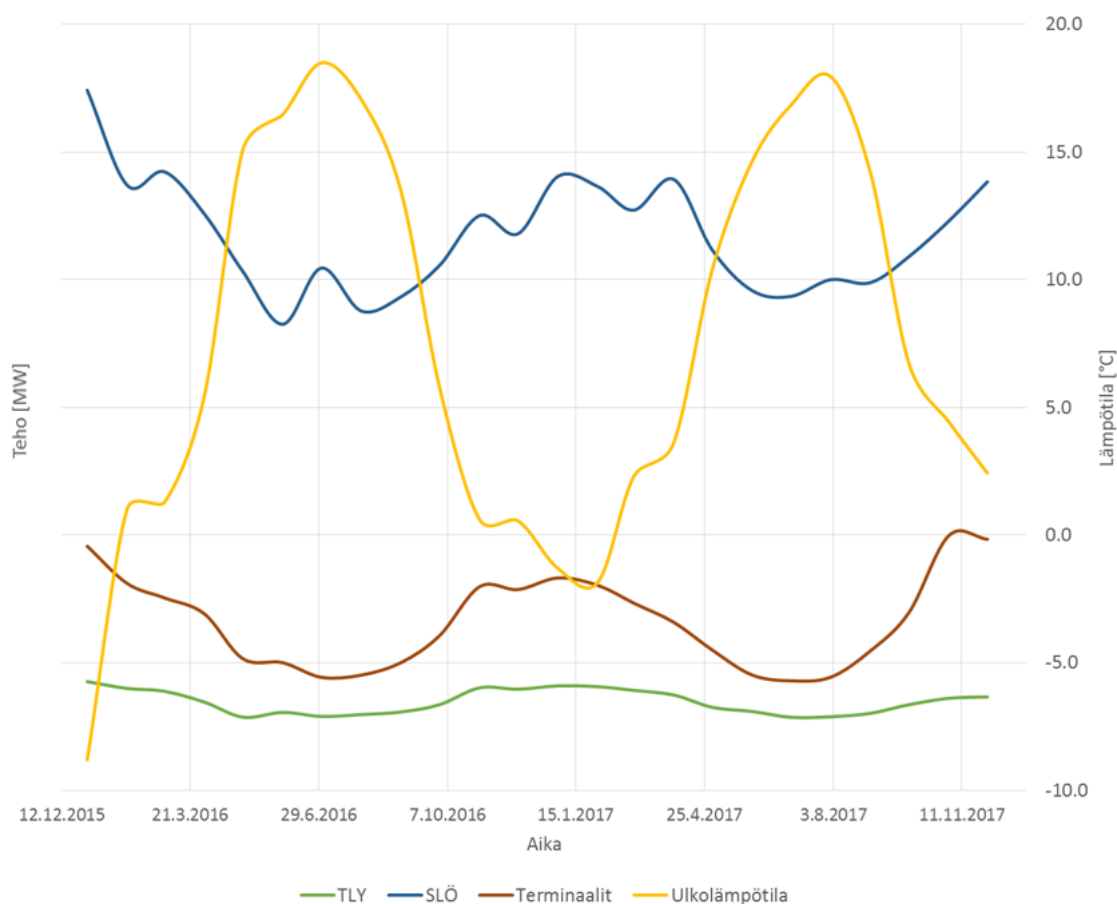
Kuva 11 Eri kohteiden prosenttiosuudet sähkön kokonaisvuosikulutuksesta Suomen jalostamolla alueittain 2014–2017

Jalostamon sähkönkulutuksen suhdetta ulkolämpötilan muutoksiin on tutkittu vuosina 2014–2017 vertaamalla talvikuukausien (lokakuu-huhtikuu) keskimääräisiä kuukausikulutuksia kesäkuukausien (toukokuu-syyskuu) keskimääräiseen kulutukseen. Vuosina 2014–2017 keskimääräinen ulkolämpötila kesäkuukausina on ollut 15,2 °C ja talvikuukausina 2,3 °C. Laskennassa ei otettu huomioon niitä poikkeuksellisia kuukausia, jolloin alueen sähkönkulutus on ollut normaalista selvästi poikkeavaa esimerkiksi seisakkien aikana. Taulukosta 1 nähdään, kuinka paljon eri alueiden talvikuukausien sähkönkulutus on keskimäärin suurempi verrattuna kesäkuukausiin. Nähdään, että tuotantolinjojen sähkönkulutus ei näytä merkittävästi korreloivan ulkoilman lämpötilan kanssa, vaikka TL3:lla keskimääräinen talvikulutus on ollut tarkasteluvälillä 4,9 % kesäkulutusta suurempi. Kuitenkin muilla alueilla korrelaatiota on havaittavissa. Esimerkiksi jalostamon kiinteistöjen (REM) sähkönkulutus on keskimääräisesti talvella 5,9 % suurempi verrattuna kesään. Prosentuaalisesti selvästi

suurimmat erot sähkönkulutuksessa kesän ja talven välillä on nähtävissä säiliöalueella, terminaaleilla ja TLY:llä. Todennäköisesti tämä johtuu sähkösaatoista ja erilaisista sähkölämmittimistä, joilla ylläpidetään haluttua syötön/jalosteen lämpötilaa. Taulukosta 1 nähdään myös, että vuosina 2014–2017 Nesteen Suomen jalostamon keskimääräinen sähkönkulutus on kasvanut 4,1 %, kun ulkolämpötila on laskenut 12,9 °C. Datan rajallisesta määrästä johtuen edellä mainittu lämpötilakorrelaatio pätee todennäköisesti parhaiten 0–20 °C ulkolämpötiloilla. Vahva lämpötilakorrelaatio vuosien 2016–2017 aikana säiliöalueen, TLY:n ja terminaalien sähkönkulutuksessa nähdään myös kuvasta 12.

Taulukko 1 Eri alueiden keskimääräisten sähkönkulutusten osuudet kokonaiskulutuksesta talvi- ja kesäkuukausina vuosina 2014–2017

Osuus kokonaiskulutuksesta	TL1	TL2	TL3	TL4	TL5	TLY	SLÖ	Terminaalit	REM	Yhteensä
Talvella [%]	17,6	14,4	18,5	25,4	12,3	1,0	6,4	2,4	2,1	100
Kesällä [%]	18,3	14,7	18,4	25,9	12,5	0,9	5,7	1,7	2,1	100
Talvikulutus suurempi [%]	0,3	2,0	4,9	2,1	2,2	23,7	16,7	43,9	5,9	4,1



Kuva 12 TLY:n, SLÖ:n ja terminaalien sähkönkulutuksen suhde ulkolämpötilaan vuosina 2016–2017

2.4.2 Sähkönkulutus laitetasolla

Laitetason sähkönkulutusta jalostamon alueella on haastavampi arvioida kuin aluekohtaista kulutusta, koska tarkkaa mittaustietoa kulutuksesta on saatavilla pääasiassa muuntamotasoille asti. Vain suurissa kompressoreissa ja pumpuissa on olemassa reaaliaikainen sähkönkulutuksen mittausta. Tässä kappaleessa esitettävät tiedot perustuvat Nesteellä käytössä olevien kunnossapito- ja energiajärjestelmien tietoihin. Tiedot laitteista ovat osittain puutteellisia eikä laitetasonanalyysiin sisälly esimerkiksi rakennusten jäähdytys- ja ilmanvaihtokoneita.

Jalostamon sähkölaitteet voi karkeasti jakaa pumppuihin, kompressoreihin, erilaisiin puhaltimiin, sekoittajiin, syöttimiin, kuljettimiin, vetolaitteisiin, sähkölämmittimiin ja sähkösaattoihin. Taulukossa 2 on esitetty jalostamon alueella käytössä olevien pää- ja varasähkölaitteiden määriä. Nähdään, että pumppuja on lukumäärällisesti eniten yhteensä 2119 kappaletta ja kompressoreita vain 192 kappaletta. Puhaltimia, sekoittajia, kuljettimia ja muita laitteita on lukumäärällisesti paljon, mutta niiden tehonkulutus on todennäköisesti pientä. Sähkölämmittimiä, jotka pitävät sisällään esimerkiksi erilaisia säiliölämmittimiä, on jalostamoalueella 98 kappaletta. Sähkösaattoja jalostamon alueella on lukumäärällisesti eniten eli 46 870 kappaletta, joista on saatavilla tietoja vaihtelevasti.

Taulukko 2 Porvoon jalostamon sähkölaitteiden kappalemääriä

	Päälaitteet [kpl]	Varalaitteet [kpl]	Yhteensä [kpl]
Pumput	1 622	497	2 119
Kompressorit	180	12	192
Lauhdutuspuhaltimia	282	2	284
Sekoittajat	266	1	267
Syöttimet, kuljettimet, vetolaitteet	136	0	136
Sähkölämmittimet	-	-	98
Muita	36	1	37
Sähkösaatot	-	-	46 870
Yhteensä	2 522	513	50 003

Kysyntäjoustopuolelta kiinnostavimpia laitteita ovat suuren teholuokan laitteet, joiden nimellistehot ovat yli 100 kW, koska markkinapaikkojen minimitarjouskoot vaihtelevat 0,1-10 MW välillä (kappale 4). Ilman aggregointia esimerkiksi 5 MW:n tarjousta on vaikea saada koottua jopa suuren teholuokan laitteilla jalostamon prosessien monimutkaisuuden takia. Eri kysyntäjoustopuolelta markkinapaikat asettavat myös erilaisia vaatimuksia resurssin säädettävyydelle, mikä voi vaatia erillisiä investointeja. Porvoon jalostamon pumppujen ja kompressoreiden määriä eri teholuokissa on eroteltu taulukossa 3. Pienen teholuokan laitteiden nimellistehot ovat kymmeniä kilowatteja, keski suurten satoja kilowatteja ja suurten tuhansia kilowatteja. Taulukosta 3 nähdään, että lukumäärällisesti selvästi eniten jalostamolla on pienen teholuokan pumppuja ja kompressoreita.

Taulukko 3 Porvoon jalostamon pumppujen ja kompressoreiden kappalemääriä eri teholuokissa

	Pienet 0<P(kW)≤100 [kpl]	Keskisuuret 100<P(kW)≤1000 [kpl]	Suuret P(kW)>1000 [kpl]
Pääpumput	1 365	240	17
Varapumput	377	108	12
Pääkompressorit	111	49	20
Varakompressorit	4	5	3

Mittausdataa sähkölaitteiden todellisesta sähkönkulutuksesta on saatavilla vain Porvoon jalostamon isoimmista pumpuista ja kompressoreista. Taulukossa 4 on esitetty reaaliaikaisen sähkönkulutuksen mittauksen omaavien laitteiden keskimääräisen yhteenlasketun tehonkulutuksen osuudet Porvoon jalostamon sähkön kokonaiskulutuksesta vuonna 2017. Nähdään, että keskimäärin isoimmat kompressorit kuluttavat 25 % ja isoimmat pumput 8 % koko jalostamon sähkönkulutuksesta. Lisäksi kompressoreiden kulutuksesta 78 % on tuorevetykompressoreiden kulutusta, mikä tarkoittaa sitä, että vuonna 2017 tuorevetykompressorit kuluttivat noin 20 % koko jalostamon sähkönkulutuksesta.

Taulukko 4 Porvoon jalostamon suurimpien pumppujen ja kompressoreiden todellisen sähkönkulutuksen osuudet Porvoon jalostamon sähkön kokonaiskulutuksesta vuonna 2017

	Tehomittauksilla varustetut laitteet [kpl]	Osuus jalostamon sähkön kokonaiskulutuksesta [%]
Pumput	53	8
Kompressorit	35	25

3 Tasehallinta Suomessa

Suomessa Fingrid vastaa sähkönkulutuksen ja -tuotannon hetkellisestä tehotasapainosta eli tasehallinnasta. Sähköverkon taajuutta pyritään ylläpitämään Pohjoismaissa normaalitilanteessa 49,90 ja 50,10 hertsin välillä esimerkiksi Nord Poolin tukkumarkkinoilla ja Fingridin reservi- ja säätösähkömarkkinoilla. Sähkömarkkinaosapuolen on huolehdittava jatkuvasti sähkönkulutuksen/myynnin ja -tuotannon/hankinnan välisestä tehotasapainosta eli sähkötaseesta. Käytännössä tuotannon ja kulutuksen ennustaminen harvoin onnistuu täydellisesti, minkä takia tasevastaava joutuu tasapainottamaan yli- tai alijäämäisen taseen Fingridin toimittamalla tasesähköllä. Sähkömarkkinaosapuolella on oltava avoin toimittaja, joka hoitaa tasehallinnan. Jos avoin toimittaja on Fingrid, osapuolta kutsutaan tasevastaavaksi. [31, 32] Kuvassa 13 on esitetty tehotasapainon ylläpidon periaatteet Suomen sähkömarkkinoilla. Sähkömarkkinatoimijat tasapainottavat sähkötaseensa tuntitasolla Nord Poolin tukkumarkkinoilla ja Fingrid vastaa puolestaan hetkellisestä tehotasapainosta [33].

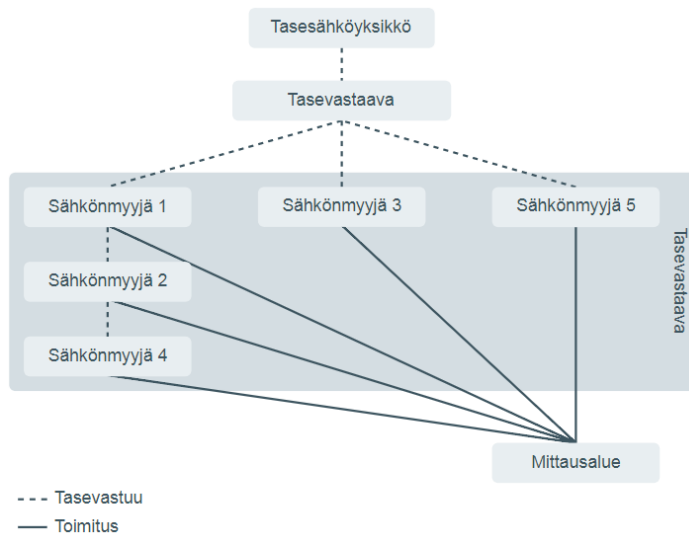
Käyttötunti +12h - 36h	Käyttötunti + 1 - 32h	Käyttötunti
ELSPOT	ELBAS	Reservit Säätösähkömarkkinat
Kahden välinen sähkökauppa		
Fyysinen sähkökauppa Markkinatoimijat		Tasehallinta Fingrid

Kuva 13 Suomen sähkömarkkinoiden tasehallinta [33]

Sähkömarkkinaosapuolen on mahdollista hyödyntää kysyntäjoustoa tasehallinnassaan esimerkiksi pyrkimällä minimoimaan kulutustaseensa tasevirhettä tai ohjaamalla kulutustasetaan siten, että saa tasesähkökaupoista taloudellista hyötyä. Tehokas kysyntäjoustoressien käyttö tasehallinnassa vaatii kuitenkin, että toimija voi säätää ohjattavaa kapasiteettiaan lähellä käyttötuntia riittävän tarkasti ja nopeasti pohjautuen ennustettuun kulutukseen ja/tai ennustettuun tasesähkön hintaan. [2]

3.1 Taseselvitys

Sähkömarkkinoilla toimivien osapuolten väliset sähkön toimitukset selviävät taseselvityksen tuloksena. Samalla muodostetaan myös jokaisen osapuolen sähkötase. Kuvassa 14 on kuvattu tasevastaavan rooli taseselvityksessä, joka perustuu avointen toimitusten ketjuihin ja hierarkkiseen taseselvitysmalliin. Ylimpänä ketjussa on Fingridin tasesähköyksikkö, joka on tasevastaavan avoin toimittaja. Puolestaan kaikki tasevastaavan alla olevat toimitusketjut kuuluvat tasevastaavan tasevastuuseen. Tasevastaavalla on oltava voimassa oleva sopimus Fingridin ja taseselvitysyksikön kanssa [32]. Tällä hetkellä taseselvityslaskenta tehdään tunnin tarkkuudella perustuen tuntienenergiamittauksiin, tuotantosuunnitelmiin, tyyppikuormituskäyriin ja kiinteisiin toimituksiin. [34]



Kuva 14 Taseselvityksen osapuolet [34]

Näillä näkymin Pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt siirtyvät yhtä aikaa 15 minuutin taseselvitykseen vuoden 2020 puolivälissä tarkoittaen sitä, että päivän sisäisessä kaupankäynnissä (Elbas) sekä säätösähkömarkkinoilla siirrytään 15 minuutin kaupankäyntijaksoon. Vuorokausimarkkinoilla, sähkönkäytössä ja sähköntuotannossa siirrytään 15 minuutin jaksoihin pidemmällä aikavälillä. Muutos perustuu tasehallinnan verkkosääntöön (Electricity Balancing Guideline), joka näillä näkymin astuu voimaan vuoden 2018 alusta. Verkkosäännöllä pyritään siihen, että jatkossa sähköenergian hinta pystytään määrittämään tarkemmin ja sitä kautta saadaan mahdollisesti lisää uuden teknologian investointeja esimerkiksi kysyntäjouston, jotta käynnissä olevaa sähköjärjestelmän muutosta pystytään hallitsemaan paremmin. Lyhempään taseselvitysjaksoon siirtyminen aiheuttaa kaikille markkinaosapuolille kustannuksia muun muassa vaadittavista tietojärjestelmämuutoksista, mittareiden uudelleen ohjelmoinnista ja ennenaikaisesta uusimisesta sekä kasvavasta tiedonsiirron tarpeesta. [35, 36]

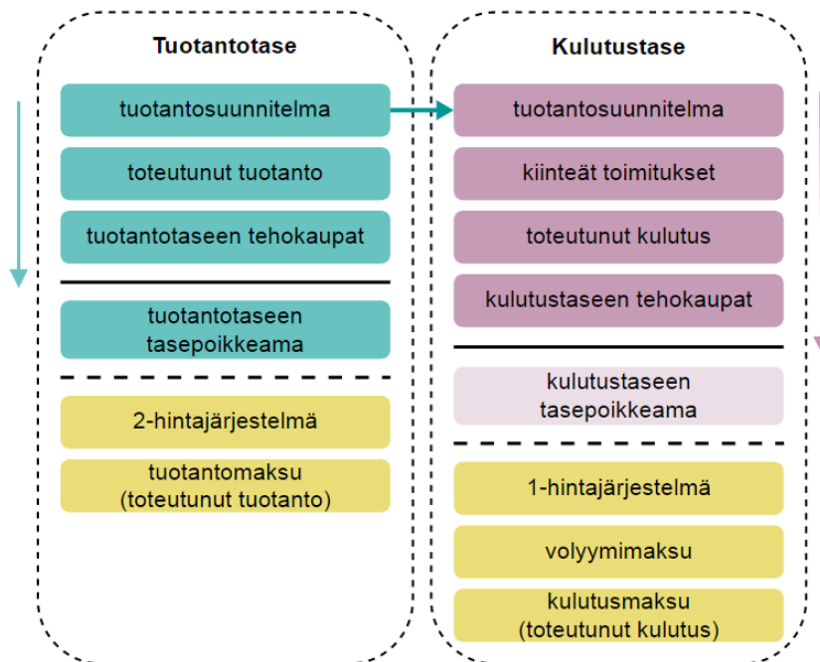
3.2 Kahden taseen malli

Pohjoismaissa on käytössä kahden taseen tasepalvelumalli, joka koostuu tuotanto- ja kulutustaseesta. Kahden taseen mallissa, jota on havainnollistettu kuvassa 15, tuotanto käsitellään yhdessä taseessa ja sähkön myynnit, ostot ja kulutus toisessa taseessa. Lisäksi tuotantotaseen tuotantosuunnitelma, joka tulee olla raportoituna 45 minuuttia ennen käyttötunnin alkua, siirtyy taseselvityksessä kulutustaseessa käsiteltäväksi.

Tuotantotase muodostuu tasevastaavan toteutuneesta tuotannosta ja tuotantosuunnitelmasta ja siihen lasketaan kuuluvaksi nimellisteholtaan yli 1 MVA:n voimalaitoksen generaattorit. Pienemmät generaattorit puolestaan käsitellään kulutustaseessa kulutusta pienentävästi. Toteutuneen tuotannon ja tuotantosuunnitelman erotuksena syntyy tuotantotaseen tasepoikkeama, joka on alijäämäinen, kun toteutunut sähköntuotanto on tuotantosuunnitelmaa pienempi. Tällöin taseensa tapainottamiseksi tasevastaava joutuu ostamaan tasesähköä Fingridiltä. Jos tasepoikkeama on ylijäämäinen, myy tasevastaava tasesähköä Fingridille. [37, 38]

Kulutustase puolestaan muodostuu tasevastaavan tuotantosuunnitelmasta, toteutuneesta kulutuksesta sekä kiinteistä kaupoista. Toteutuneen kulutuksen ja sähkönhankinnan erotuksena

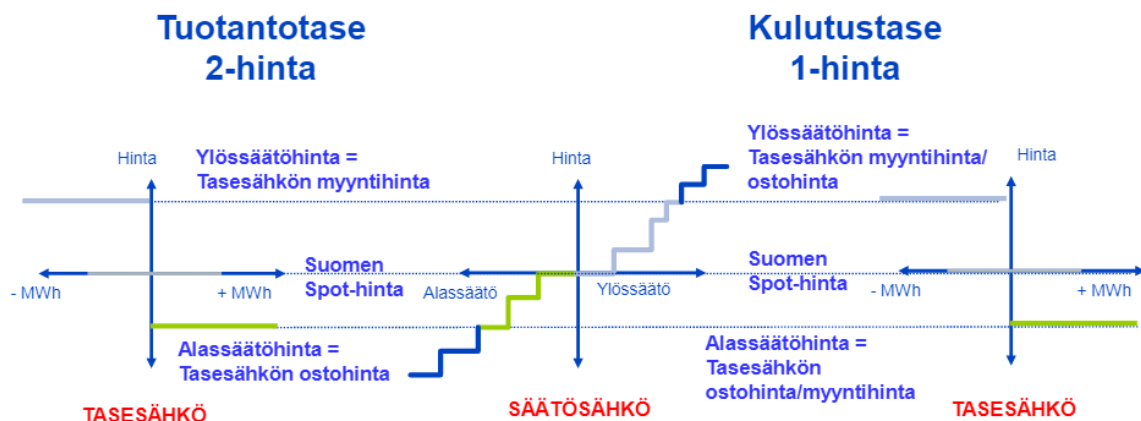
syntyy kulutustaseen tasepoikkeama, joka on alijäämäinen, kun sähkönkulutus on suunniteltua suurempaa. Tällöin tasevastaava joutuu ostamaan tasesähköä Fingridiltä. Jos tasepoikkeama on ylijäämäinen eli tasevastaava kuluttaa suunniteltua vähemmän sähköä, myy tasevastaava tasesähköä Fingridille. [39]



Kuva 15 Kahden taseen tasepalvelumalli, muokattu [37]

Tärkeä ero mallien välillä on se, että tuotantotaseen tasepoikkeamalle sovelletaan kaksihintajärjestelmää ja kulutustaseen tasepoikkeamalle yksihintajärjestelmää. Lisäksi kulutustaseen tasesähkölle kohdistetaan volyymimaksu toisin kuin tuotantotaseen tasesähkölle. Tasesähkön hinnoittelun perustana on vuorokausimarkkinoiden (Elspot) Suomen tarjousalueen hinta sekä säätösähkökauppojen perusteella syntyvä tuntikohtainen säätösähkön hinta, josta on kerrottu tarkemmin kappaleessa 4.3.4. Elspot-markkinahintaa käytetään silloin, kun säätösähkömarkkinoilla ei ole tehty lainkaan säätöjä tai säätöjä on tehty yhtä paljon molempiin suuntiin. Kun sekä ylös- että alassäätöjä on tehty tunnin aikana, määritellään tunti ylös- tai alassäätötunniksi sen mukaan kumpaan suuntaan on säädetty energiamääräisesti enemmän. [40]

Tuotantotaseen kaksihintajärjestelmässä tasesähkön myynnille ja ostolle lasketaan oma hinta siten, että tasesähkön myyntihinnaksi eli Fingridin tasevastaavalle myymän tasesähkön hinnaksi tulee ylössäätötunnilla ylössäätöhinta ja alassäätötunnilla Suomen vuorokausimarkkinoiden aluehintaa. Toisaalta tasesähkön ostohinnaksi tulee alassäätötunnilla alassäätöhinta ja ylössäätötunnilla vuorokausimarkkinoiden Suomen aluehintaa. Kulutustaseen yksihintajärjestelmässä tasesähkön myynti- ja ostohinnat ovat yhtä suuret. Kulutustaseessa tasesähkön hinnaksi tulee alassäätötunnilla alassäätöhinta ja ylössäätötunnilla ylössäätöhinta. Jos säätöjä ei ole tehty lainkaan tai niitä on tehty yhtä paljon, tasesähkön hintana kulutustaseessa on Suomen Elspot-hinta. Tasesähkön hinnan muodostuminen on havainnollistettu kuvassa 16. [40, 41]



Kuva 16 Tasesähkön hinnan muodostuminen säätösähkön hintaan perustuen tuotanto- ja kulutustaseissa [42]

3.3 Reservikustannusten kattaminen

Reserveistä aiheutuvat ylläpitokustannukset Fingrid kattaa tasepalvelussa kerättävin maksuin ja kantaverkkotariffilla. Lisäksi säätösähkömarkkinoiden kustannukset katetaan tasesähkökaupalla. [43] Tasepalvelun suurin kustannus aiheutuu reserveistä, joilla ylläpidetään kantaverkon taajuutta ja käyttövarmuutta. Kustannukset kohdistetaan tasepalvelutariffin ja kantaverkkotariffin kesken kuvan 17 mukaisesti. [44]

Tasepalvelutariffi 2/3 kulutusmaksulla, 1/3 tuotantomaksulla		Kantaverkkotariffi	
Taajuusohjattu käyttöreservi 100 %	Automaattinen taajuudenhallintareservi 100 %		
Taajuusohjattu häiriöreservi 10 %	Säätökapasiteettimarkkinat, Fingridin varavoimailaitokset ja käyttöoikeuslaitokset 10 %	Taajuusohjattu häiriöreservi 90 %	Säätökapasiteettimarkkinat, Fingridin varavoimailaitokset ja käyttöoikeuslaitokset 90 %

Kuva 17 Reservikustannusten kattaminen [44]

Tämä tarkoittaa sitä, että taajuuden ylläpidosta aiheutuvat kustannukset tulevat loppujen lopuksi käyttäjien maksettavaksi erilaisten tariffien kautta. Jos esimerkiksi hankalasti säädetävissä olevan ja säästä riippuvan uusiutuvan energian tuotannon määrä sähköjärjestelmässä kasvaa ja sitä kautta taajuuden heilahtelut yleistyvät, tarkoittaa se myös suurempia reservikustannuksia Fingridille. Tilanteesta hyötyisivät eniten säädetävää kapasiteettia omaavat markkinaosapuolet, jotka pystyvät hyödyntämään sähkön kysyntäjoustoja omassa kulutuksessaan, koska silloin muut osapuolet kantaisivat suhteessa enemmän vastuuta reservikustannuksista.

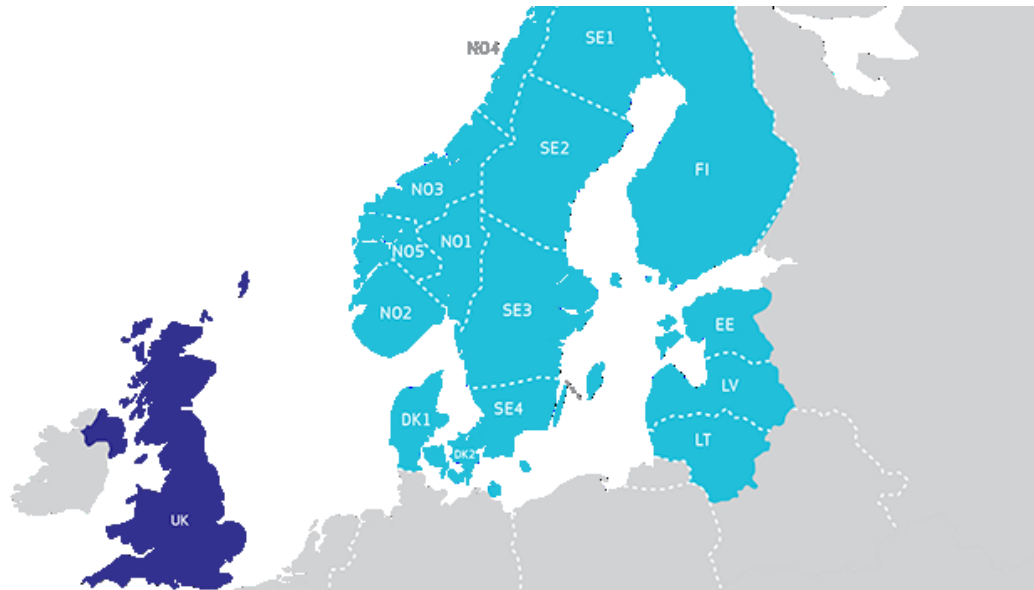
4 Sähkömarkkinoiden rakenne ja kysyntäjouaston markkinapaikat

Kysyntäjousta voidaan hyödyntää Pohjoismaissa sähkölaskun pienentämiseen tai rahan ansaitsemiseen useilla eri markkinoilla. Tärkeimmät sähkökaupan markkinapaikat ovat sähköpörssi Nord Poolin operoimat Elspot-markkinat (day-ahead) ja päivän sisäiset Elbas-markkinat (intra-day). Lisäksi kantaverkkoyhtiöt hallinnoivat taajuudenhallintareservimarkkinoita verkon taajuuden hallitsemiseksi normaali- ja häiriötilanteissa. Kantaverkkoyhtiön hallinnoimat taajuuden palautusreservit jaetaan automaattisiin ja manuaalisesti ohjattaviin markkinoihin. Säätosähkömarkkinoita Pohjoismaissa käytetään palauttamaan järjestelmän taajuus lähelle verkon normaalitaajuutta eli 50 Hz:ä, mutta myös määrittämään hinnat taloudelliselle epätasapainolle tasehallinnassa. Eri markkinapaikat eroavat toisistaan pääasiassa reaktioajan ja vaaditun aktivoitumisajan suhteen. Reaktioajat vaihtelevat muutamista sekunneista muutamiin tunteihin ja vaaditut aktivoitumisajat käytännössä muutamista minuuteista yhteen tuntiin. [45]

4.1 Nord Poolin Elspot- ja Elbas-markkinat

Suurin osa Pohjoismaiden sähkökaupasta käydään sähköpörssi Nord Poolissa, jonka omistavat pohjoismaiset ja baltialaiset kantaverkkoyhtiöt [46]. Sähköpörssin kaupankäynti jakautuu fyysisiin markkinoihin ja finanssimarkkinoihin. Fyysiset markkinat eli spot-markkinat koostuvat Elspot- ja Elbas-markkinoista, joilla kaupankäynti johtaa aina sähköön fyysiseen toimitukseen. Keskeisiä toimijoita tarjontapuolella ovat voimalaitoksia omistavat sähköntuottajat ja kysyntäpuolella sähköön vähittäismyyjät sekä suuret teollisuusyritykset, jotka ostavat tarvitsemansa sähköön suoraan pörssistä. [47]

Pohjoismaiset järjestelmävastaavat ovat jakaneet omat alueensa eri tarjousalueisiin kuvan 18 mukaisesti. Ruotsissa on neljä, Norjassa on viisi ja Tanskassa kaksi tarjousaluetta. Suomessa, Virossa, Latviassa ja Liettuassa on jokaisessa vain yksi tarjousalue. Suomen kantaverkko on varsin vahva, minkä takia Suomi muodostaa sähköenergian tukkumarkkinoilla yhden hinta-alueen [48]. Eri tarjousalueet auttavat huomaamaan siirtojärjestelmän rajoitteet ja siten varmistavat, että alueelliset markkinaolosuhteet heijastuvat sähköön hintaan. [49]

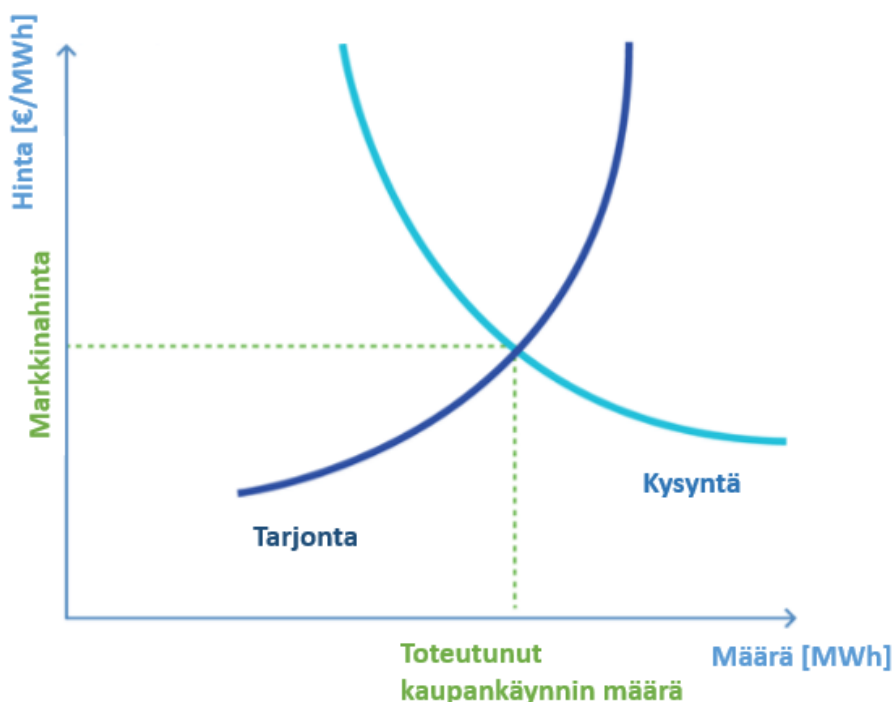


Kuva 18 Nord Poolin Elspot-markkinan tarjous- ja hinta-alueet [49]

Sähköpörssin tärkein markkina on Elspot-markkina (day-ahead), jossa käydään huutokauppaa sähkön toimituksesta seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille. Elspot-markkinalla yritykset jättävät anonyymisti osto- ja myyntitarjouksensa päivittäin klo 13:00 mennessä Suomen aikaa Nord Poolin day-ahead kaupankäyntijärjestelmään. Tarjoukset sisältävät ostettavan ja myytävän sähkön hinnan ja määrän jokaista vuorokauden tuntia kohden. Seuraavan vuorokauden tuntikohtaiset hinnat julkaistaan klo 13:42 Suomen aikaa tai myöhemmin. [47, 50] Elspot-markkinalla kaupankäynti sulkeutuu 12–36 tuntia ennen sähkön fyysistä toimitusta ja pienimmillään kauppaa voidaan käydä 0,1 MWh/h kiinteästä sähkön toimituksesta yhdelle tai useammalle seuraavan vuorokauden tunneista [51].

Markkinaosapuolet voivat lähettää 0–2000 €/MWh hintarajoissa sekä blokki- että tuntitarjouksia. Tuntitarjoukset tehdään hinnan ja määrän suhteen ehdollisina rajatarjouksina, kun taas blokkitarjouksissa useampi tunti on sidottu toisiinsa ja ne toteutuvat joko kokonaisuudessaan tai eivät lainkaan. Kysyntäjoustopuolelta Elspot-markkinan vaatimukset kapasiteetin säädettävyydelle ja määrälle ovat melko vähäiset ja markkinalla on mahdollista käyttää joustavia tarjousstrategioita ottaen huomioon kysyntäjoustopuolelta tehokkaan käytön. [2, 47, 50] Vuonna 2016 Nord Poolissa käytiin kauppaa Pohjoismaiden ja Baltian Elspot-markkinalla 391 TWh:n edestä [52]. Fingridin arvion mukaan 3.11.2017 Suomessa oli kysyntäjoustopuolelta Elspot-markkinalla 200–600 MW [53].

Elspot-markkinan systeemi hinta muodostuu tunneittain Pohjoismaiden ja Baltian tarjousalueilla jätettyjen osto- ja myyntitarjousten perusteella muodostettujen tarjouskäyrien leikkauspisteeseen, jota on havainnollistettu kuvassa 19. Systeemi hinta kertoo, kuinka paljon sähkö maksaisi koko Nord Poolin markkina-alueella, jos eri tarjousalueiden välillä olisi rajaton sähkönsiirtokapasiteetti. Alueiden väliin syntyy pullonkauloja, kun siirtotarve ylittää siirtorajajärjestelmän siirtokyvyn. Silloin alueiden hinnat eriytyvät verrattuna systeemi hintaan ja toisiinsa. Alueet, joilla on ylituotantoa alueen omaan kysyntään nähden, vievät sähköä alituotantoalueille fyysisten siirtorajoitusten puitteissa, jolloin ylijäämä alueiden aluehinnat laskevat ja alijäämä alueiden aluehinnat nousevat. [49, 54] Vuonna 2017 Suomen aluehinta Elspot-markkinalla oli keskimäärin 33,19 €/MWh systeemi hinnan ollessa keskimäärin 29,41 €/MWh [55].



Kuva 19 Elspot-hinnan muodostuminen sähköpörssissä kysynnän ja tarjonnan lain mukaisesti, muokattu [50]

Elbas-markkina, jolle osallistuvat tällä hetkellä Pohjoismaat, Baltia, Iso-Britannia ja Saksa, on sähkön toimitusta edeltävän vuorokauden sisäinen jälkimarkkina Elspot-kaupalle, millä pyritään pääasiassa tasapainottamaan sähkön kysynnän ja tarjonnan erot, joita on syntynyt Elspot-kaupassa esimerkiksi odottamattomista isojen voimalaitosten alasajoista tai ennusteista poikkeavan tuulivoiman tuotannon takia. Elbas-markkinalla kaupankäynnin kohteena on 0,1 MW:n kerrannaiset ja kiinteä sähkön toimitus tunneille, joille on jo olemassa Elspot-hinta [51]. Joka päivä klo 15:00 Suomen aikaa julkaistaan Elbas-markkinan kaupankäynnin kapasiteetit ja kauppaa käydään vuorokauden ympäri. Kaupankäynti Elbas-markkinalla sulkeutuu tunteja ennen toimitustuntia ja hinta muodostuu kuten arvopaperipörssissä eli kauppa syntyy, kun sähkön osto- ja myyntihinnat kohtaavat. Elbas-markkinan volyymi on selvästi pienempi kuin Elspot-markkinalla sillä Pohjoismaiden, Baltian ja Saksan yhteenlaskettu Elbas-markkina vuonna 2016 oli 5,1 TWh [52]. Tulevaisuudessa päivän sisäisen markkinan merkitys tulee todennäköisesti kasvamaan, kun sääriippuvaisen tuulienergian tuotanto kasvaa merkittävästi. [47, 56]

Kysyntäjoustopuolelta Elbas-markkina asettaa tiukemman aktivoitumisvaatimuksen kysyntäjoustopuolelta verrattuna Elspot-markkinan, koska resurssia on kyettävä säätämään yhden tunnin sisällä kaupan toteutumisesta. Haasteena Elbas-markkinalla on myös nykyinen pieni kaupankäynnin volyymi, mikä voi tarkoittaa sitä, että kauppa ei markkinalla aina toteudu, jos osto- ja myyntihinnat eivät kohtaa. Tämä voi vaikeuttaa merkittävästi kysyntäjoustopuolelta hyödyntämistä Elbas-markkinalla, mutta toisaalta toimijan riittävä kysyntäjoustopuolelta hyödyntäminen voi mahdollistaa taseen korjaamisen ilman Elbas-kaupankäyntiä, jos esimerkiksi kaupankäynnin volyymi markkinalla on pieni ja hintataso korkea. [2] Vuonna 2017 keskimääräinen Suomen Elbas-markkinan kaupankäyntihinta oli 32,60 €/MWh ja keskimääräinen kaupankäyntivolyyymi tunneittain 177,42 MWh [57]. Fingridin arvion mukaan 3.11.2017 Suomessa oli kysyntäjoustopuolelta Elbas-markkinalla 0–200 MW [53].

Elspot- ja Elbas-markkinoilla on mahdollista hyödyntää kysyntäjoustoa esimerkiksi pienentämällä sähkönkulutusta hinnan ollessa korkea. S-ryhmän kysyntäjoustoprojektin selvityksen mukaan esimerkiksi prismojen varavoimakoneita on mahdollista hyödyntää Elspot- ja Elbas markkinoilla pienentämään sähkönkulutusta korkean sähkönhinnan tunneilla. [58]

4.2 Sähkön johdannaismarkkinat

Tulevaa sähkön myyntiä tai ostoa voi suojata finanssimarkkinoilla tehtävillä johdannaisso-
pimuksilla, jos toimija haluaa pienentää spot-markkinoiden hintavaihteluista aiheutuvaa ris-
kiä. Kauppaa sähkön johdannaistuotteilla voi käydä NASDAQ Commoditiesin kautta tai
kahdenvälisesti perustuen yritysten suoriin kontakteihin tai välittäjien kautta toimiviin OTC-
markkinoihin (Over The Counter). Yleensä johdannaissopimukset eivät johda sähkön fyysi-
seen toimitukseen, mutta kahdenväliset johdannaissopimukset voivat niin tehdä. Merkittävin
kaupankäyntipaikka sähkön johdannaismarkkinoilla Pohjoismaissa on NASDAQ Commo-
ditiesin ylläpitämät johdannaismarkkinat, jonka tarjoamia sopimuksia ovat futuurit, forwar-
dit, hintaerosopimukset (EPAD) ja optiot. Futuurit ja forwardit ovat sopimuksia tulevaisuu-
dessa tehtävistä kaupoista. NASDAQ Commodities noteeraa futuurisopimuksina päivä-,
viikko-, kuukausi-, neljännesvuosi- ja vuosisopimuksia ja forwardina kuukausi-, neljännes-
vuosi- ja vuosisopimuksia. EPAD (Electricity Price Area Difference) on johdannainen,
jonka referenssihintana on systeemihinnan ja tietyn aluehinnan erotus. [46, 59]

Johdannaismarkkinat mahdollistavat myös sen, että sähkönmyyjä voi tehdä asiakkaansa
kanssa määräaikaisen kiinteähintaisen sopimuksen, vaikka myyjällä ei olisi omaa sähkön
tuotantoa. Sopimuksia on mahdollista tehdä lyhimmillään päivän ja pisimmillään jopa kym-
menen vuoden mittaisia. Nord Poolin laskema systeemihinta toimii yleensä referenssihin-
tana Pohjoismaisilla finanssimarkkinoilla. [46, 48, 59]

Riittävällä määrällä kysyntäjoustoressurseja toimija voi esimerkiksi pienentää pitkän aika-
välin sähkön suojauksien tasoaan tai varmentaa suojauksien riittävyys ja siten pienentää säh-
könhankinnan kustannuksiaan. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kun sähkönhinta nou-
see ja suojauksien taso on riittämätön, voi toimija pienentää sähkönkulutustaan hyödyntä-
mällä kysyntäjoustoressursejaan ja näin välttyä sähkön ostamiselta kalliiseen markkinahin-
taan. [2]

4.3 Reservi- ja säätösähkömarkkinat

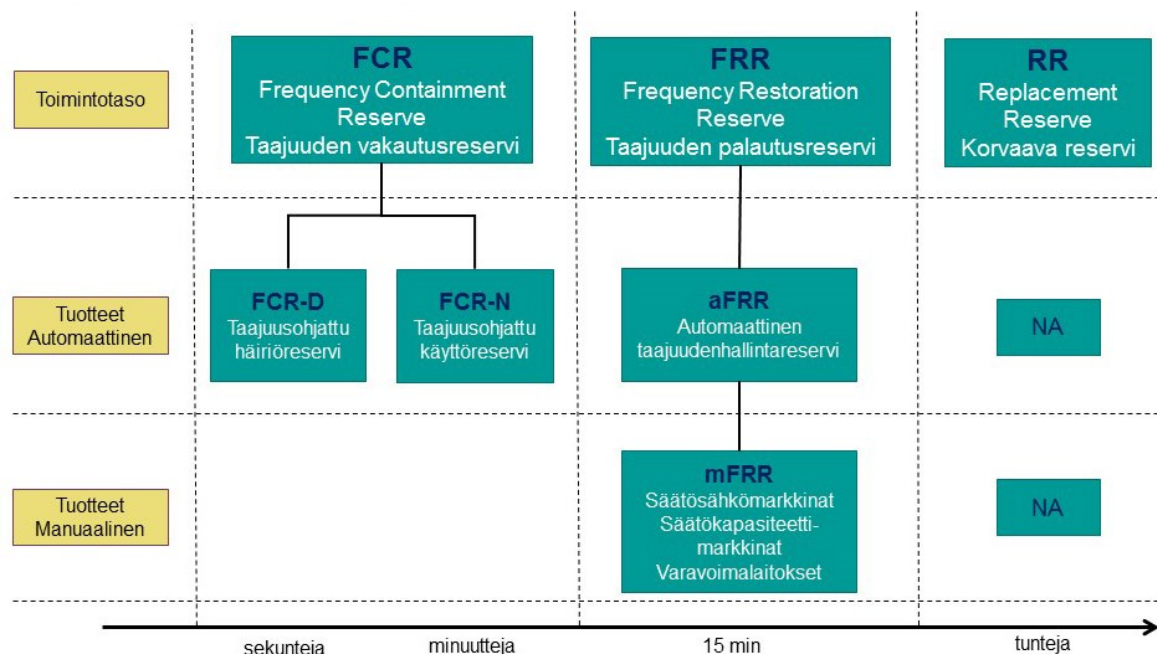
Suomessa käytössä oleviin reserveihin lukeutuvat Fingridin ylläpitämät reservit sekä Ener-
giaviraston valvoma erillinen tehoreservijärjestelmä [2]. Pohjoismaisessa yhteiskäyttöjärjes-
telmässä, johon kuuluvat Suomi, Ruotsi, Norja ja Itä-Tanska, on sovittu reservien ylläpito-
velvoitteista Pohjoismaisten järjestelmävastaavien välisellä käyttösopimuksella. Reservit
jaetaan vuosittain pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kesken maiden käyttämien vuo-
sienergioiden suhteessa. Reservien ylläpitovelvoitteet vuodelle 2017 on esitetty taulukossa
5. Suomessa ylläpidetään joka hetki 140 MW taajuusohjattua käyttöreserviä normaalitilan
taajuudensäätöä varten. Toisaalta taajuusohjattua häiriöreserviä ylläpidetään niin paljon, että
pysyvä taajuuspoikkeama on pienempi kuin 0,5 Hz, kun esimerkiksi suuri tuotantoyksikkö
irtoaa verkosta häiriötilanteessa. Normaalissa käyttötilanteessa taajuusohjattua häiriöreser-

viä on Suomessa noin 220–265 MW. Aamu-, ilta- ja vuorokauden vaihdetunneilla automaattista taajuudenhallintareserviä (aFRR) on sovittu Suomessa ylläpidettävän 70 MW. Kukin kantaverkkoyhtiö ylläpitää nopeaa häiriöreserviä oman alueensa mitoittavan vian verran. [60]

Taulukko 5 Reservien ylläpitovelvoitteet Suomessa ja Pohjoismaissa [61]

Reservi	Suomen velvoite [MW]	Pohjoismaiden velvoite [MW]
Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)	220–265	1200
Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)	140	600
Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR)	70	300
Nopea häiriöreservi (mFRR)	880–1100	-

Kuvassa 20 on esitetty reservilajien jaottelu niiden käyttötarkoituksen perusteella. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi ovat taajuuden vakautusreservejä ja niitä käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan. Automaattinen taajuudenhallintareservi ja nopea häiriöreservi ovat taajuuden palautusreservejä, joiden tarkoituksena on palauttaa taajuus normaalialueelle ja vapauttaa aiemmin aktivoituneet taajuuden vakautusreservit. Korvaavilla reserveilla palautetaan aiemmin aktivoituneet taajuuden palautusreservit takaisin valmiuteen, jotta ne ovat käytettävissä mahdollisessa uudessa vikatilanteessa. [62]



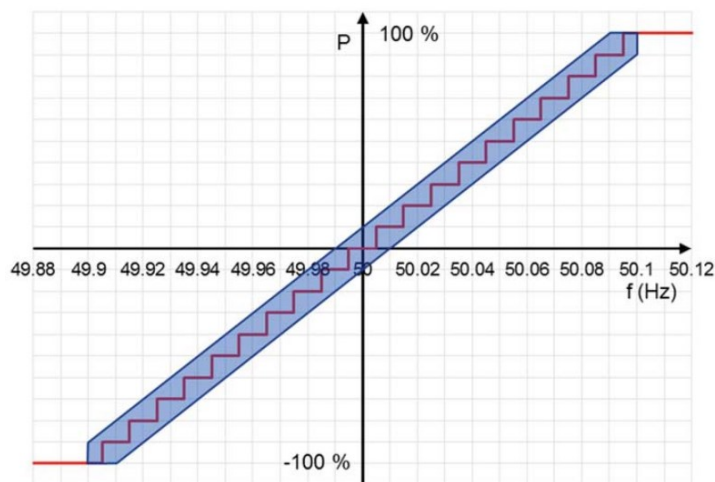
Kuva 20 Pohjoismaissa käytössä olevat reservilajit [62]

Fingrid hankkii osan reservivelvoitteestaan tarjouskilpailun perusteella vuosimarkkinoilta Suomessa sijaitsevista voimalaitoksista ja kuormista. Lisäksi Fingrid ostaa reserviä Venäjän

ja Viron tasesähköyhteysiltä sekä päivittäin tuntimarkkinoilta kotimaasta ja muista Pohjoismaista. [63] Kuitenkin muista Pohjoismaista voidaan normaalitilanteessa hankkia enintään yksi kolmasosa taajuusohjattujen reservien velvoitteesta, jotta taajuus saadaan ylläpidettyä myös saarekekäyttötilanteessa esimerkiksi siirtoyhteysien vikaantuessa naapurimaihin [64]. Jotta reservikohde voi osallistua reservimarkkinoille, tulee sen täyttää kyseisen reservituotteen tekniset ja markkinapaikan edellytykset. Sama reservinmyyjä voi aggregoida eli yhdistää reservikohteita siten, että vaatimukset markkinapaikalle osallistumiseksi täytyvät. Lisäksi taajuusohjatussa käyttö- ja häiriöreservissä on mahdollista yhdistää joustokohteita kulutus- ja tuotantotaseista saman ja eri tasevastaavien alta, kun säätösähkömarkkinoilla aggregointi on mahdollista vain saman tasevastaavan reservikohteilla. Kaikkien reservikohteiden tulee myös sijaita Suomessa tai olla kytkettävissä suoraan Suomen sähköverkkoon. Lisäksi säätökokeilla todennetaan automaattisten reservien säätöominaisuudet, jotta varmistutaan siitä, että reservikohde täyttää markkinapaikan vaatimukset. [65]

4.3.1 Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)

Taajuusohjattu käyttöreservi (Frequency Containment Reserve for Normal operation) on taajuuden vakautusreservi, jossa reservikohteen tulee säätää lähes lineaarisesti taajuusalueella 49,90–50,10 Hz ja reagoida vähintään $\pm 0,05$ Hz taajuusmuutoksiin. Reservin automaattinen jatkuvasti tapahtuva ohjaus perustuu paikalliseen taajuusmittaukseen ja reservin tulee pystyä sekä tehonlisäykseen että tehonpudotukseen. Säädon tulee aktivoitua täysimääräisesti kolmessa minuutissa 0,10 Hz:n taajuusmuutoksesta verkon normaalitaajuudesta. Relekytketyn reservikohteen tulee säätää paloittain lineaarisesti taajuusalueella 49,90–50,10 Hz tarkoittaen sitä, että reservikapasiteettia pitää olla mahdollista säätää asteittain. Kuvassa 21 on kuvattu erästä vaatimukset täyttävää relekytketyn resurssin aktivoitumista, missä punainen viiva kuvaa säätökäyrää ja sininen alue sallittua aktivoitumisaluetta. [61, 63]



Kuva 21 Esimerkki relekytketyn resurssin aktivoitumisesta taajuusohjatussa käyttöreservissä, kuvassa taajuus x-akselilla ja reservikapasiteetti y-akselilla [63]

Taajuusohjatun käyttöreservin teknisiä ominaisuuksia vastaavaa kapasiteettia on mahdollista tarjota vuosi- ja/tai tuntimarkkinoille. Erona näillä markkinoilla on muun muassa, että vuosimarkkinoille järjestetään tarjouskilpailu kerran vuodessa syys-lokakuussa eikä markkinalle voi osallistua kesken sopimuskauden. Toisaalta tuntimarkkinoille voi osallistua myös

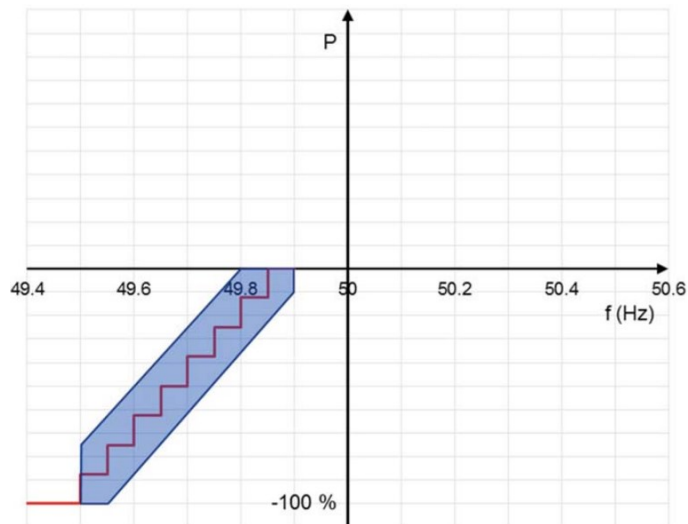
kesken vuoden tekemällä siitä sopimuksen Fingridin kanssa. Vuosimarkkinoilla reservisuunnitelmien, jotka on jätettävä seuraavan vuorokauden tunneille klo 18:00 mennessä, mukaiset määrät ostetaan täysimääräisesti kiinteällä hinnalla koko vuoden. Hinta määräytyy kalleimman vuosimarkkinoille hyväksytyn tarjouksen mukaan. Toisaalta tuntimarkkinoilla käytetään vain tarvittava määrä tarjouksia, jotka on jätetty edellisenä päivänä klo 18:30 mennessä, halvin ensin periaatteella. Korvaus määräytyy erikseen kullekin tunnille kalleimman käytetyn tarjouksen mukaan ja Fingrid vahvistaa seuraavan vuorokauden kaupat klo 22:00 mennessä. [66, 67]

Kysyntäjouaston tarjoaminen taajuusohjatun käyttöreservin markkinalle edellyttää vähintään 0,1 MW:n kapasiteettia ja korvausta maksetaan ylläpidetystä kapasiteetista ja tasevastaavalle myös nettoenergiasta. Alitaajuustilanteessa reservinhaltija myy reservisähköä Fingridille säätösähkömarkkinoiden ylössäätöhintojen mukaisesti ja ylitaajuustilanteessa reservinhaltija ostaa reservisähköä Fingridiltä säätösähkömarkkinoiden alassäätöhintojen mukaisesti. [61, 68] Käytännössä reservisähkön määrä ja siten energiakorvauksen suuruus jää usein melko pieneksi, koska alas- ja ylössäädöt kumoavat tunnin sisällä melko hyvin toisensa [69]. Vuosimarkkinoilla kapasiteettikorvaus vuonna 2017 oli 13 €/MW tuntia kohden. Toisaalta vuonna 2017 tuntimarkkinoiden keskimääräinen kapasiteetin kaupankäyntihinta oli 21,09 €/MW tuntia kohden ja volyymipainotettu keskihinta 27,46 €/MW tuntia kohden. Kaupankäyntiä tapahtui 98,9 prosentilla vuoden tunneista. [70, 71] Fingridin mukaan 3.11.2017 Suomessa oli kysyntäjousto taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla 2,1 MW [53].

Taajuusohjatun käyttöreservin markkinalle Seam Group Oy on todennut olevan mahdollista osallistua esimerkiksi pakkasvaraston kylmäkoneita, höyrystimiä ja lauhduttimia ohjaavan automaation asetuksia muokkaamalla [72]. Lisäksi Pöyryn selvityksessä on todettu potentiaalisiksi taajuusohjatun käyttöreservin kohteiksi heidän tutkimansa vesitornin pumpput ja jätevedenpuhdistamon puhdistusprosessin ilmakompressorit, jotka vaativat kysyntäjouaston toteuttamiseksi taajuusmuuttajan, jolla ohjataan koneita sähköverkon taajuuden heilahtelujen mukaan [73].

4.3.2 Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)

Taajuusohjattu häiriöreservi (Frequency Containment Reserve for Disturbances) on taajuuden vakautusreservi, jossa reservikohteen tulee säätää lähes lineaarisesti, kun taajuus laskee alle 49,90 Hz:n ja olla kokonaan aktivoitunut taajuudella 49,50 Hz. Reservin automaattinen ohjaus perustuu paikalliseen taajuusmittaukseen ja reservin tulee kyetä vain ylössäätöön eli tarkoittaen voimalaitoksilla tehonlisäystä ja kuormilla tehonpudotusta. Kun taajuusmuutos on -0,50 Hz nimellistaajuudesta, reservin kapasiteetista tulee aktivoitua puolet viidessä sekunnissa ja 30 sekunnissa reservin tulee olla kokonaan aktivoitunut. Relekytketty reservi-kohde voi puolestaan säätää paloittain lineaarisesti taajuusalueella 49,50–49,90 Hz esimerkiksi kuvan 22 esittämällä tavalla, missä punainen viiva kuvaa säätökäyrää ja sininen alue sallittua aktivoitumisaluetta.



Kuva 22 Esimerkki relekytketyn resurssin aktivoitumisesta taajuusohjatussa häiriöreservissä, kuvassa taajuus x-akselilla ja reservikapasiteetti y-akselilla [63]

Vaihtoehtoisesti koko relekytketty kohde voidaan kytkeä irti samanaikaisesti, jolloin kuorman irtikytkennän täytyy noudattaa yhtä tai useampaa taulukossa 6 esitettyä irtikytkentäportasta ja kuorman voi kytkeä takaisin verkkoon, kun taajuus on ollut normaalialueella 49,90 Hz vähintään kolmen minuutin ajan. Yhden irtikytkentäportaan reserviä käytetään isoissa taajuushäiriöissä ja niitä Fingrid hankkii enintään 100 MW kullekin tunnille. [61, 63]

Taulukko 6 Relekytketyn kuorman sallitut irtikytkentäportaat, kun koko relekytketty kohde kytetään irti samanaikaisesti [63]

Taajuus [Hz]	Irtikytkentäaika [s]
$\leq 49,70$	≤ 5
$\leq 49,60$	≤ 3
$\leq 49,50$	≤ 1

Taajuusohjatulla häiriöreservillä on samanlaiset vuosi- ja tuntimarkkinat kuin kappaleessa 4.3.1 esitetyllä taajuusohjatulla käyttöreservillä. Kysyntäjoustop tarjoaminen taajuusohjatun häiriöreservin markkinalle edellyttää vähintään 1 MW:n kapasiteettia ja korvaus maksetaan ylläpidetystä kapasiteetista. [61, 68] Vuonna 2017 vuosimarkkinoilla korvaustaso oli 4,7 €/MW tuntia kohden. Toisaalta vuonna 2017 tuntimarkkinoiden keskimääräinen kaupankäyntihinta oli 10,07 €/MW tuntia kohden, volyymipainotettu keskihinta 17,18 €/MW tuntia kohden ja kaupankäyntiä tapahtui 33,7 prosentilla vuoden tunneista. [71, 74] Fingridin mukaan 3.11.2017 Suomessa oli kysyntäjoustop taajuusohjatun häiriöreservin markkinalla noin 430 MW, josta noin puolet saatiin kulutuksen joustosta ja puolet sähköntuotannosta [53, 75].

Merkittävä häiriöreservin lähde tällä hetkellä on aggregoidut kasvihuoneiden valaistuksen säädöt [75]. Markkinalle on myös todettu soveltuvan älyohjatun käyttövesivaraajan ja suoran sähkölämmityksen omaavien kotitalouksien aggregoituja lämmityskuormia [76]. Organisaatioiden äkillisiä häiriötilanteita varten ylläpitämiä varavoimageneraattoreita on myös mahdollista hyödyntää taajuusohjatun häiriöreservin markkinalla, jos varavoimakoneisiin on yhdistetty UPS-järjestelmä (Uninterruptable Power Supply eli keskeytymätön virransyöttö). Ilman UPS-järjestelmää varavoimakoneet käynnistyivät 15–30 sekunnin kuluessa Fingridin, Enegian ja Digita Networks Oy:n yhteisessä pilotissa. [73, 77]

4.3.3 Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR)

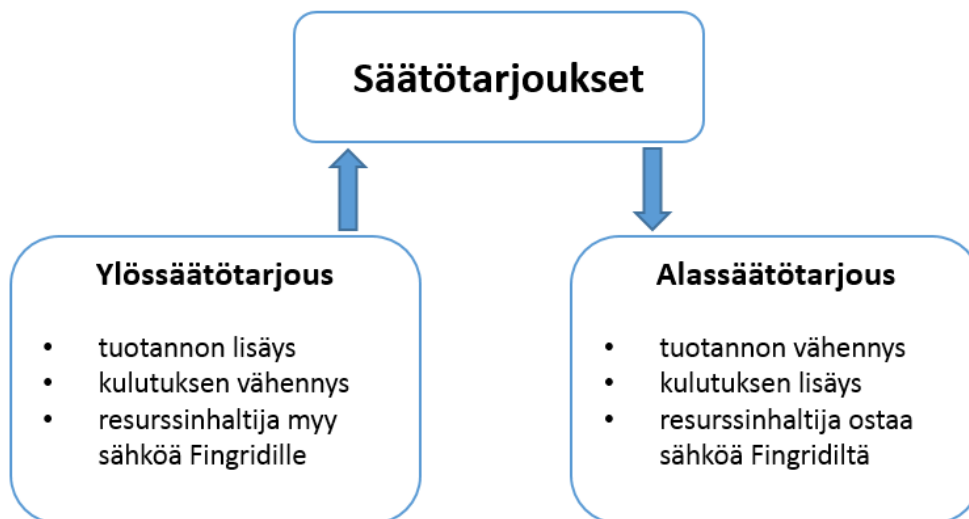
Automaattinen taajuudenhallintareservi (automatic Frequency Restoration Reserve) on taajuuden palautusreservi, jonka tarkoituksena on vapauttaa aktivoituneet taajuuden vakautusreservit takaisin käyttöön. Reservi säätää jatkuvasti voimalaitoksen tai kulutuskohteen ohjetehoa Fingridiltä tulevan tehonpyyntisignaalin mukaisesti. Reservikapasiteetin on alettava säätää viimeistään 30 sekunnin kuluessa tehonpyyntisignaalin vastaanotosta ja kapasiteetin on oltava täysin aktivoitu 120 sekunnin kuluessa. Markkinalle on mahdollista osallistua ylös- ja alassäätötarjouksin, mutta mahdollista on tarjota myös yhdensuuntaista säätöä. Tarjousten aktivoinnit tapahtuvat tarjouskokojen suhteessa yhteispohjoismaiselta tarjouslistalta periaatteella halvin tarjous ensin. Tarjouksia aktivoidaan yleisimmin aamun ja illan tunneilla, jolloin voimajärjestelmän tasehallinta on haasteellisinta. [61, 78, 79]

Markkinan minimitarjouskoko on nykyisin 5 MW, mutta myöhemmin mahdollisesti esimerkiksi 1 MW, kun suunnitteilla oleva yhteispohjoismainen aFRR-markkina mahdollisesti toteutuu. Markkinalla maksetaan korvausta reservikapasiteetista ja tasevastaavalle myös säädetyistä nettoenergiasta. Ero taajuusohjattuun käyttöreserviin on se, että kapasiteettikorvaus maksetaan hyväksytyn tarjouksen hinnan mukaisesti. Energiakorvauksen korvausperiaate on sama kuin FCR-N markkinalla (kappale 4.3.1). [79, 80] Vuonna 2017 ylössäätökapasiteetin kaupankäyntituntien keskihinta oli 24,46 €/MW tuntia kohden ja keskimääräinen volyymipainotettu keskihinta oli 25,12 €/MW tuntia kohden. Alassäätökapasiteetin kaupankäyntituntien keskihinta oli 12,65 €/MW tuntia kohden ja keskimääräinen volyymipainotettu keskihinta oli 13,09 €/MW tuntia kohden. Vuonna 2017 kaupankäyntiä tapahtui noin 11 prosentilla vuoden tunneista. [81, 82] Fingridin mukaan 3.11.2017 Suomessa ei ollut lainkaan kysyntäjoustoa automaattisen taajuudenhallintareservin markkinalla [53].

4.3.4 Säätosähkömarkkinat (mFRR)

Säätosähkömarkkinat ovat osa manuaalisesti ohjattavia taajuuden palautusreservejä (manual Frequency Restoration Reserve). Yhdessä muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa Fingrid ylläpitää säätosähkömarkkinoita tasehallinnan ja verkon taajuuden hallitsemiseksi. Tuotannon ja kuorman haltijat voivat antaa säätötarjouksia säätökykyisestä kapasiteetistaan säätosähkömarkkinoille, jos tasevastaavalla on voimassa oleva tasepalvelusopimus. [83] Muut kapasiteetin haltijat voivat osallistua markkinoille tasevastaavansa kautta tai tekemällä Fingridin kanssa erillisen säätosähkömarkkinasopimuksen, jonka kiinteä vuosimaksu on 1200 € [84].

Säätosähkötarjouksen pienin tarjouskoko on 10 MW ja tehomuutos on kyettävä toteuttamaan 15 minuutin kuluessa kaupan toteutumisesta. Kuitenkin, jos käytössä on elektroninen tilaus, pienin tarjouskoko on vain 5 MW. Tarjoukset on jätettävä Fingridille viimeistään 45 minuuttia ennen käyttötuntia. Tarjouksen tulee sisältää perustiedot säädettävästä kapasiteetista eli tiedot kapasiteetin tehosta (MW) ja hinnasta (€/MWh), onko säätöresurssi tuotantoa vai kulutusta ja missä nimetty resurssi sijaitsee. Säätötarjouksia on olemassa kahdenlaisia. Ylös- ja alassäätötarjoukset ovat joko tuotannon lisäystä tai kulutuksen vähentämistä, jolloin resurssin haltija myy sähköä Fingridille. Alassäätötarjoukset ovat puolestaan joko tuotannon vähennystä tai kulutuksen lisäystä, jolloin reservinhaltija ostaa sähköä Fingridiltä. Alas- ja ylös- ja alassäätötarjousten ominaisuudet on esitetty kuvassa 23. [83]



Kuva 23 Säätötarjousten ominaisuudet [83]

Kaikista tarjouksista laaditaan pohjoismainen säätötarjouslista, jossa tarjoukset asetetaan hintajärjestykseen. Säätötarjoukset käytetään hintajärjestyksessä voimajärjestelmän käyttötilanne huomioiden siten, että alassäätötarjouksista käytetään ensin kallein tarjous ja ylös-säätötarjouksista puolestaan halvin tarjous. Hetkellinen voimajärjestelmän käyttötilanne voi myös estää tarjouksen käyttämisen. Säätosähkön hinnoittelu perustuu säätosähkömarkkinoilla toteutuneisiin kauppoihin, jolloin jokaiselle käyttötunnille määritetään sekä alas- että ylös-säätöhinta. Kallein käytetty ylös-säätötarjous muodostaa ylös-säätöhinnan, joka on kaikille markkinaosapuolille sama. Ylös-säätötarjouksen suurin mahdollinen hinta on 5000 €/MWh [85]. Ylös-säätöhinta on kuitenkin aina vähintään Nord Poolin Suomen hinta-alueen hinnan suuruinen (Elspot-FIN). Toisaalta halvin käytetty alassäätötarjous muodostaa alas-säätöhinnan, joka on korkeintaan Nord Poolin Suomen hinta-alueen hinnan suuruinen (Elspot-FIN). Fingrid maksaa kaikille, joilta se on tilannut alassäätöä tunnin aikana, yhtäläisen alassäätöhinnan. Säätosähkön hinnat julkaistaan Nord Poolin kotisivuilla viimeistään kaksi tuntia käyttötunnin jälkeen ja joskus ylös-säätöhinta nousee satoihin tai jopa tuhansiin euroihin [61, 83]. Vuonna 2017 keskimääräinen ylös-säätöhinta oli 37,27 €/MW tuntia kohden, keskimääräinen volyymipainotettu ylös-säätöhinta 64,29 €/MW tuntia kohden ja ylös-säätöä tilattiin 28,7 % vuoden tunneista. Toisaalta vuonna 2017 keskimääräinen alassäätöhinta oli 29,09 €/MW tuntia kohden, keskimääräinen volyymipainotettu alassäätöhinta 16,99 €/MW tuntia kohden ja alassäätöä tilattiin 38,8 % vuoden tunneista. [86] Fingridin arvion mukaan 3.11.2017 Suomessa oli kysyntäjoustoä säätosähkö- ja säätökapasiteetti-markkinoilla 100–300 MW [53].

Säätosähkömarkkinoille on markkinan vaatimusten puolesta helpompi osallistua verrattuna esimerkiksi taajuusohjattuihin reserveihin. Siten jo edellä mainituilla aggregoiduilla kasvi-huoneiden valaistuksen säädöillä ja älyohjatun käyttövesivaraajan omaavilla sähkölämmitteisillä kotitalouksilla on mahdollisuus osallistua säätosähkömarkkinoille [73, 76]. Pöyryn selvityksen mukaan metallinjalostusteollisuudessa on mahdollista osallistua säätosähkömarkkinoille esimerkiksi paljon sähköä kuluttavan prosessin avulla tai isoja pumppuja ja kompressoreita säätämällä. Selvityksen mukaan haasteena kuitenkin on se, että kysyntäjoustoä saatavat korvaukset ovat suhteellisen pieniä toiminnalle aiheutuviin riskeihin verrattuna varsinkin, jos sähkön hinta on matalalla tasolla. [73] Lisäksi erilaiset varavoimakoneet soveltuvat käytettäväksi säätosähkömarkkinoilla säätävänä kuormana. [58, 87]

4.3.5 Nopea häiriöreservi ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)

Nopea häiriöreservi on osa manuaalisesti ohjattavia taajuuden palautusreservejä ja sillä tarkoitetaan varmistettua 15 minuutin ylössäätökapasiteettia vähintään 10 MW:n säädöllä. Pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden sopimuksella kukin maa ylläpitää nopeaa häiriöreserviä aina oman alueensa mitoittavan vian verran. Periaatteena on, että mitoittava vika ei saa johtaa jännitteen romahdukseen, kuormien irtikytkentään, liian suuriin jännite- ja taajuuspoikkeamiin ja verkko-osien ylikuormittumisiin [88]. Suomessa mitoittava vika tarkoittaa tyypillisesti 880–1100 MW riippuen sen hetkisestä käyttötilanteesta. Fingrid täyttää vastuunsa sekä omistamallaan että pitkäaikaisilla käyttöoikeussopimuksilla hankituilla varavomalaitoksilla, jotka eivät tällöin ole käytettävissä kaupalliseen sähköntuotantoon. Lisäksi Fingrid voi hankkia nopeaa häiriöreserviä naapurimaiden kantaverkkoyhtiöiltä. [61]

Säätökapasiteettimarkkinat on otettu uutena reservilajina käyttöön keväällä 2016 korvaamaan päättyneitä pitkäaikaisia sopimuksia suurteollisuuden irtikytkettävistä kuormista. Näin Fingrid varmistaa, että sillä on mitoittavaa vikaa vastaava määrä nopeaa häiriöreserviä myös omien ja vuokravaravomalaitosten huoltojen ja muiden ei käytössä olon aikoina. [89] Toisin sanoen seuraavan päivän säätösähkömarkkinoille on varmistettu tällöin ylössäätötarjouksia riittävä määrä. Säätökapasiteettimarkkinoilla yhden tarjouksen vähimmäiskapasiteetti on 5 MW, jos säädön voi tilata elektronisesti sanomalla tai 10 MW, jos Fingrid tilaa säädön puhelimitse. Tarjous voi myös koostua useasta alle 10 MW yksiköstä mahdollistaen resurssien aggregoinnin. Tarjouksia voi tehdä sellaisista kapasiteeteista, joista Fingridillä on käytävissään reaaliaikainen tehomittaus tai tehon muutos on muuten todennettavissa reaaliaikaisesti. Lisäksi reservikapasiteetin on oltava (manuaalisesti) täysin aktivoitu 15 minuutin kuluessa Fingridin tilauksesta ja säätö on voitava toteuttaa koko käyttötunnin ajan. [61, 84, 85]

Säätökapasiteettimarkkinat poikkeavat muista markkinoista siinä, että niillä tehdään viikkotason hankintaa eli kapasiteetti kilpailutetaan viikoksi kerrallaan, jolloin kilpailutuksessa valituksi tullut reservinmyyjä sitoutuu jättämään ylössäätötarjouksia säätösähkömarkkinoille aina edellispäivänä klo 13:00 mennessä. Nämä säätökapasiteettitarjoukset käytetään säätösähkömarkkinoilla markkinaehtoisten säätötarjousten jälkeen. Säätökapasiteettimarkkinoilla reservinmyyjä saa kapasiteettikorvausta hyväksytyn viikkotarjouksen mukaisesti sekä lisäksi korvausta ylössäätötarjouksen mahdollisesta aktivoitumisesta ja tarjouksen pysyvyydestä. Energiakorvaukset kuitenkin pienentävät maksettavaa kapasiteettikorvausta. [61, 90] Vuonna 2017 keskimääräinen kapasiteettikorvaus on ollut noin 458 €/MW per viikko [91]. Fingridin mukaan todennäköisesti esimerkiksi Digita Networks Oy:n varavomageneraattoreita voidaan hyödyntää säätökapasiteettimarkkinalla [77].

4.3.6 Tehoreservi

Suomessa käytössä oleva Energiaviraston tehoreservijärjestelmä turvaa sähkön toimitusvarmuuden tilanteissa, joissa sähkön markkinaehtoinen tarjonta ei riitä kattamaan sähkönkulutusta. Reservi pohjautuu vuonna 2011 uudistettuun lakiin: ”Laki sähköntuotannon ja -kulutuksen välistä tasapainoa varmistavasta tehoreservistä.” Tehoreserviin voivat osallistua sekä sähkönkulutuksen joustoon kykenevät kohteet että voimalaitokset. Energiavirasto kilpailuttaa reservilaitokset, määrittää tarvittavan tehoreservin määrän Suomessa, vahvistaa reservin ehdot sekä valvoo järjestelmän toimintaa ja lain noudattamista. Lain määrittämää tehoreservipalvelua hallinnoi Fingridin tytäryhtiö Finextra Oy [92]. Tehoreservikaudella 1.7.2017–

30.6.2020 reservin kokonaiskapasiteetti on yhteensä 729 MW ja sen vuosittaiset ylläpito-kustannukset ovat 13,8 miljoonaa euroa. Järjestelmä rahoitetaan maksuilla, joita Fingrid kerää siirtopalveluiden käyttäjiltä. [93]

Tehoreserviin osallistuvien kysyntäjoustokohteiden on tarjottava valmiutta reserviin talvijaksolla 1.12–28.2 ja sitoutua tekemään tarjous säätösähkömarkkinoille Energiaviraston tarjouskilpailuun ilmoitetulla energiahinnalla (€/MWh) vähintään 12 tuntia ennen käyttötuntia. Reservillä on 10 minuutin aktivoitumisvaade ohjauskäskyn antamisesta ja pienin tarjouskoko on 10 MW, mutta se voi koostua myös useammasta yksittäisestä kulutuskohteesta. Lisäksi reservillä tulee olla valmius talvijaksolla yhteensä vähintään 200 tunnin aktivointiin ja yhtämittäiseen kahden tunnin aktivointiin kuuden tunnin lepoajalla, jonka jälkeen reservi on kyettävä aktivoimaan uudestaan. [94] Nykyisen tehoreservikauden talvikausille on valittu kysyntäjoustokohteina Suomenojan lämpöpumppu 10 MW:n sähkökulutuksen joustolla sekä Katri Valan lämpöpumppulaitos 12 MW:n joustoteholla. [93]

4.4 Yhteenveto kysyntäjouaston markkinapaikoista

Yhteenvedot kysyntäjouaston markkinapaikoista ja niiden hinnoitteluperusteista on esitetty taulukoissa 7 ja 8. Taulukossa 7 on keskitytty markkinapaikkojen eroihin sopimustyypeissä, säädettävyys- ja aktivoitumisaikavaatimuksissa, joustokohteen aktivointien yleisyydessä ja markkinapaikalle osallistumiseen tarvittavan pienimmän tarjouskoon suuruudessa. Taulukossa 8 on esitetty eri markkinapaikkojen rahallisen korvaustason määräytymisen periaatteet ja suuruus pohjautuen vuoden 2017 toteutuneisiin hintoihin. Lisäksi liitteessä 1 on esitetty yksinkertaistettu yhteenveto taulukosta 7, missä eri markkinapaikat on jaoteltu automaattisiin, manuaalisiin ja Nord Poolin markkinoihin ja painotettu niiden aktivoitumisaikavaatimuksia ja muita tärkeimpiä ominaisuuksia.

Taulukko 7 Yhteenveto kysyntäjoustop markkinapaikkojen minimitarjouskoista, säädettävyys- ja aktivoitumisaikavaatimuksista ja aktivointien yleisyydestä [2, 95]

Markkina- paikka	Sopi- mus- tyyppi	Minimitar- jouskoko	Säädettävyys- ja aktivoitumisaika- vaatimukset	Aktivointi
Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)	Vuosi- ja tuntimark- kinat	0,1 MW	Lineaarisesti välillä 50,1–49,9 Hz, akti- voiduttava 100 % 3min 0,1 Hz muu- toksesta	Jatkuvasti
Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)	Vuosi- ja tuntimark- kinat	1 MW	Voimalaitokset: li- neaarisesti välillä 49,9–49,5 Hz, kun taajuus alle 49,5 Hz 50 % 5s ja 100 % 30s	Voimalaitoskoneisto: useita kertoja vuoro- kaudessa
			Relekytketyt kuor- mat: paloittain li- neaarisesti 5-30s välillä 49,50– 49,90 Hz tai 100 % 5s kun f alle 49,7 Hz tai 3s kun f alle 49,6 Hz tai 1s kun f alle 49,5 Hz	Relekuorma: muuta- man kerran vuodessa
Automaattinen taajuudenhallin- tareservi (aFRR)	Tunti- markkinat	5 MW	100 % 2 min Fingri- din lähettämän te- honpyyntisignaalin mukaisesti	Useita kertoja vuoro- kaudessa
Säätösähkö- markkinat (mFRR)	Tunti- markkinat	5 MW elekt- ronisella ti- lauksella ja 10 MW muu- ten	100 % 15 min, Fingrid aktivoi tar- jouksia hintajärjes- tyksessä	Tarjouksen ja säätötar- peen mukaisesti useita kertoja vuorokaudessa
Säätökapasiteet- timarkkinat (mFRR)	Tunti- markkinat	5 MW elekt- ronisella ti- lauksella ja 10 MW muu- ten	100 % 15 min, Fingrid aktivoi tar- jouksia hintajärjes- tyksessä	Tarjouksen ja säätötar- peen mukaisesti mark- kinaehtoisten säätötar- jousten käyttämisen jälkeen
Nopea häiriöre- servi (mFRR)	Pitkäaikai- nen	10 MW	100 % 15 min	Harvoin
Elspot	Tunti- markkinat	0,1 MW	12 h	-
Elbas	Tunti- markkinat	0,1 MW	1 h	-
Tehoreservi	Pitkäaikai- nen	10 MW	Kulutuskohteella: 100 % 10 min	Harvoin

Taulukko 8 Markkinapaikkojen hinnoitteluperusteet ja korvaustaso vuonna 2017 [2, 95, 96]

Markkinapaikka	Sopimus- tyyppi	Korvaustaso vuonna 2017
Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)	Vuosimarkkinat	Kiinteä sopimushinta: kapasiteettikorvaus 13 €/MW tarjottua tuntia kohden + energiakorvaus tasevastaavalle
	Tuntimarkkinat	Markkinahinta määritetään tunnille jätettyjen tarjouksien perusteella. Kapasiteettikorvaus kaupankäyntitunneilla keskimäärin 21,09 €/MW tuntia kohden + energiakorvaus tasevastaavalle
Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)	Vuosimarkkinat	Kiinteä sopimushinta: kapasiteettikorvaus 4,7 €/MW tarjottua tuntia kohden
	Tuntimarkkinat	Markkinahinta määritetään tunnille jätettyjen tarjouksien perusteella. Kapasiteettikorvaus kaupankäyntitunneilla keskimäärin 10,07 €/MW tuntia kohden
Automaattinen taajuudenhallinta- reservi (aFRR)	Tuntimarkkinat	Kapasiteettikorvaus hyväksytyn tarjouksen mukaisesti (ylössäätö keskimäärin 24,46 €/MW ja alassäätö keskimäärin 25,12 €/MW tuntia kohden) + energiakorvaus tasevastaavalle
Säätösähkömark- kinat (mFRR)	Tuntimarkkinat	Tarjouksien perusteella määritetty markkinahinta. Ylössäätö keskimäärin 37,27 €/MW tuntia kohden ja alassäätö keskimäärin 29,09 €/MW tuntia kohden
Säätökapasiteetti- markkinat (mFRR)	Tuntimarkkinat	Viikkokorvaus kapasiteetista keskimäärin 458 €/MW + energiakorvaus säätösähkömarkkinoiden mukaisesti, joka vähennetään viikkokorvauksesta
Nopea häiriöre- servi (mFRR)	Pitkäaikainen	Vuonna 2014: 0,5 €/MWh (kapasiteetti) + 580 €/MWh (energia)
Elspot	Tuntimarkkinat	Tarjouksien perusteella määritetty markkinahinta. Suomen aluehinta keskimäärin 33,19 €/MWh
Elbas	Tuntimarkkinat	Hyväksytty tarjous toteutetaan toimijan asettamaan tarjoushintaan. Suomen tarjousalueen kaupankäyntihinnan keskiarvo 32,60 €/MWh
Tehoreservi	Pitkäaikainen	Sopimus pohjainen

5 Säiliöalueen sähkölämmittimet

Säiliöalueen sähkölämmittimien soveltuvuutta eri kysyntäjoustomarkkinoille tutkittaessa on välttämätöntä selvittää niiden rooli jalostamolla sekä laitteiden säätövara että säädettävyyys. Kysyntäjoustopotentiaalin selvittämiseksi alla on käyty läpi muun muassa säiliöiden perustiedot kuten tilavuus ja mitta-anturit, lämmittimien säätö, säiliön tuotteen lämpötilan hallinta ja lämpötilan sallittu vaihteluväli.

5.1 Yleistä säiliöalueen pohjaöljysäiliöistä T45-T51

Säiliöalueen säiliöissä T45, T46, T47, T48, T49, T50 ja T51 varastoidaan erilaisia raskaita öljytuotteita kuten pohjaöljyä. Tuotteita ajetaan tilanteen mukaan säiliöstä säiliöön, prosessista säiliöihin tai säiliöistä prosessiin. Taulukossa 9 on kuvattu säiliöiden käytössä oleva operoitava tilavuus eli se tilavuus, joka säiliöissä voi vaihdella ajon mukaan, ja pohjaöljyketjun uusien ajomallien (kappale 5.3) mukaiset varastoitavat tuotteet. [97, 98] Säiliöt ovat erittäin isoja, mikä tarkoittaa todennäköisesti myös sitä, että suurilla pohjaöljyn tilavuuksilla ja sitä kautta suurilla lämpökapasiteeteilla lämpötilamuutokset säiliöissä ovat melko hitaita.

Taulukko 9 Pohjaöljysäiliöiden operoitavat maksimitilavuudet ja varastoitavat tuotteet [97]

Varastosäiliö	Nettotilavuus [m ³]	Varastoitava tuote
T45	10 318	Tyhjötislauksen pohjaöljy (TTÖP)
T46	10 265	Tyhjötislauksen pohjaöljy (TTÖP)
T47	9 238	Tyhjötislauksen pohjaöljy (TTÖP)
T48	5 496	Tyhjötislauksen pohjaöljy (TTÖP)
T49	5 257	Ohennettu asfalteeni (OHASF)
T50	28 104	Deasfaltoitu öljy (DAO)
T51	27 994	Deasfaltoitu öljy (DAO)

Normaalioperoinnissa säiliöissä varastoitavat tuotteet pidetään tasalaatuisina säiliösekoittajien avulla, jolloin myös tuotteen lämpötila saadaan pidettyä homogeenisena koko säiliössä. Sekoittajien nimellistehot ovat suhteellisen pieniä sillä esimerkiksi säiliön T47 sekoittajan nimellisteho on 37 kW. Sekoittajat ovat päällä aina, kun tuotetta lämmitetään tai tuotetta ajetaan säiliöön. Lisäksi säiliöiden lämpötiloja mitataan reaaliaikaisesti ja lämpötilatiedoista on saatavilla historiadataa Nestein järjestelmissä. Säiliöiden T47-T49 tuotteiden lämpötiloja mitataan kolmelta eri tasolta sekä myös kaasutilasta, kun taas säiliöiden T45-T46 lämpötiloja mitataan neljältä eri tasolta, mutta kaasutilassa ei ole omaa mittauspistettä. Säiliöissä T50-T51 on lämpötilamittaukset sekä tuotteelle että kaasutilalle. Säiliöiden kaasutilat pidetään typpivirtauksella ylipaineessa hapen pääsyn estämiseksi, jotta estetään muun muassa tulipalojen syttyminen ja räjähdyskaasuseosten syntyminen säiliöissä. [98]

Pohjaöljysäiliöiden lämpötilaa voidaan ylläpitää tai nostaa sähkölämmittimien avulla. Säiliöt T45 ja T46 voidaan lämmittää pumpulla kierrättäen säiliöiden syöttölinjassa sijaitsevilla sähkölämmittimillä EA-4102A/B (nimellistehoiltaan 500 kW). Säiliöiden T47-T49 sähkölämmittimet sijaitsevat säiliöiden pohjalla, joista käytetään tässä työssä nimitystä uppokuumnennin. Kuvassa 24 on esitetty yksi säiliön T47 kahdestatoista lämmityselementistä, joista kukin sisältää 12 sähkövastusta. Säiliössä T47 on 12 kappaletta 33,3 kW:n lämmityselement-

tejä yhteisteholtaan 400 kW ja säiliöissä T48 ja T49 puolestaan 8 kappaletta 37,5 kW:n lämmityselementtejä yhteisteholtaan 300 kW. Alkuperäisessä hankintamäärittelyssä on määritetty, että uppokuumentimien tulee kyetä nostamaan säiliöiden lämpötiloja 1 °C yhden vuorokauden aikana. [99] Tämä viittaa siihen, että uppokuumentimet on mitoitettu säiliön lämpötilan ylläpitoa sekä tarvittaessa lämpötilan hidasta nostoa varten. Säiliötä T50 ja T51 voidaan tarvittaessa lämmittää pumpulla kierrättäen syöttölinjoissa sijaitsevilla sähkölämmittimillä EA-4204A/B (nimellistehoiltaan 550 kW) ja EA-4205 (nimellisteholtaan 505 kW), mutta pääsääntöisesti lämpötiloja ylläpidetään suurella tuotekierrolla, joka on 50 tonnia tunnissa. Tämän johdosta säiliöiden T50 ja T51 sähkölämmittimiä on haastavaa hyödyntää kysyntäjoustossa, koska niitä pidetään päällä vain tarvittaessa. Yhteenveto eri säiliöiden lämmittämiseen tarvittaessa käytettävistä sähkölämmittimistä ja niiden nimellistehoista on esitetty taulukossa 10. [98, 100]



Kuva 24 Yksi säiliön T47 kahdestatoista lämmityselementistä. Yksi elementti sisältää 12 sähkövastusta kukin teholtaan 2,8 kW [99, 101]

Taulukko 10 Pohjaöljysäiliöiden lämmittämiseen tarvittaessa käytettäviä sähkölämmittimiä ja niiden nimellistehot

Sähkölämmitin	Lämmityskohde	Nimellisteho [kW]
EA-4102A	T45 / T46	500
EA-4102B	T45 / T46	500
EA-4201AL	T47	400
EA-4202AH	T48	300
EA-4203AH	T49	300
EA-4204A	T50 / T51	550
EA-4204B	T51	550
EA-4205	T50	505

Prosessin toimivuuden kannalta tuotteiden lämpötila säiliöissä täytyy pitää 150–180 °C välillä. Lämpötilan laskiessa tuotteen viskositeetti kasvaa ja pumppaaminen vaikeutuu, mutta toisaalta ongelmia prosessille aiheutuu myös lämpötilan noustessa yli sallitun rajan. [102] Kysyntäjoustopotentialin kannalta tarvittavan sähkölämmittimien säätövaran tarjoavat varastosäiliöiden suuret pohjaöljytilavuudet sekä melko suuri sallittu lämpötilan vaihteluväli.

5.2 Säiliöiden T45-T49 sähkölämmittimien säätö

Säiliöiden T45-T49 sähkölämmittimiä ohjataan tyristorisäätimillä, joilla säädetään portaattomasti lämmittimien tehoa ohjausviestin 4-20 mA:n mukaisesti. Tyristorisäädin ohjaa kolmivaiheisesti säädettävää tehoa ja toimintaperiaate on niin sanottu tyristorien nollakulmaohjaus. Säädön toimintajaksona on 1 sekunti. Jos sähkölämmittimien pintalämpötila ylittää 245 °C, kytkeytyvät lämmittimet automaattisesti pois päältä. [103, 104]

Tällä hetkellä säiliöiden T45-T49 tuotteiden lämpötiloja säädetään jalostamon ohjaamosta käsin antamalla säätimelle automaatiojärjestelmään asetusarvo, joka ohjaa automaattisesti sähkölämmittimen tehoa niin, että haluttu tuotteen lämpötila saavutetaan [98]. Tyristorisäädöllä ohjatut sähkölämmittimet antavat kuitenkin tekniset valmiudet osallistua taajuusohjatun käyttöreservin markkinalle eikä jatkuva säätö myöskään aiheuta laitteille teknistä kulumista ja sitä kautta kunnossapitokustannusten nousua [105].

5.3 Uudet pohjaöljyketjun ajomallit

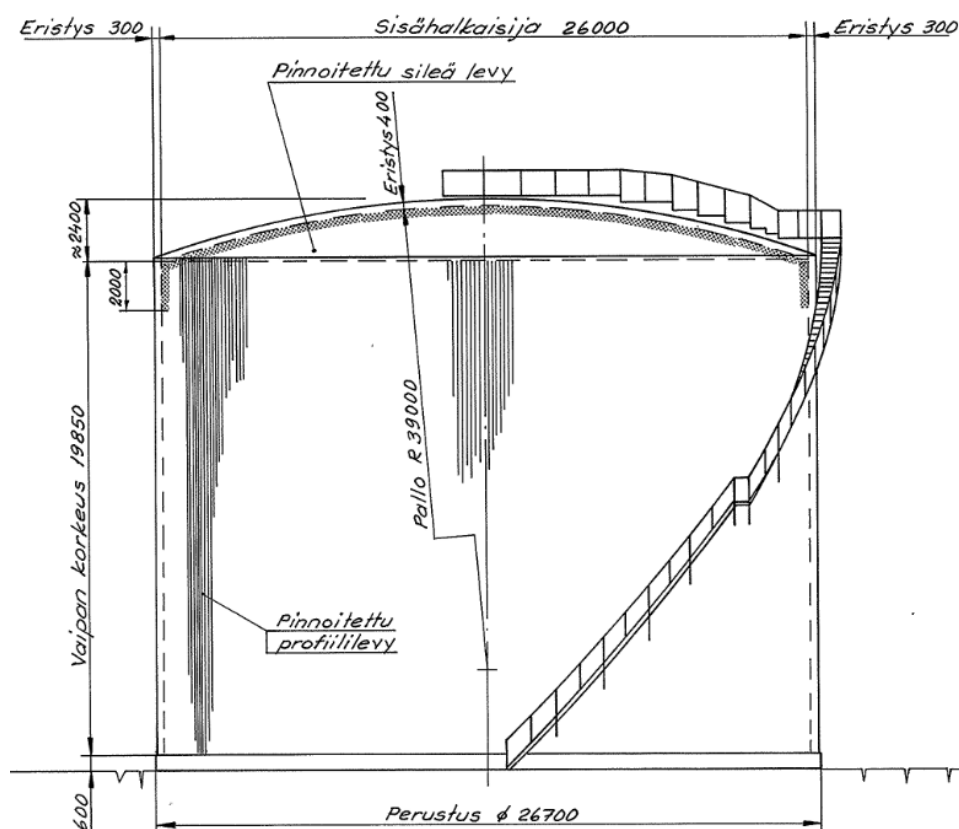
Pohjaöljyketjun ajomallit muuttuvat vuonna 2018 merkittävästi, mikä tulee vaikuttamaan myös säiliöissä T45-T51 varastoitaviin tuotteisiin, tuotemääriin ja kiertonopeuksiin. Merkittävintä uudistuksessa on jakeluterminaaliin valmistuvat uudet pohjaöljysäiliöt B1-B4, joiden vaikutusta koko pohjaöljyketjun kysyntäjoustopotentiaaliin on haastava arvioida ennalta. [97] Vasta käytäntö tulee näyttämään, miten uudet ajomallit vaikuttavat säiliöalueen pohjaöljysäiliöiden ja kappaleessa 7.3 analysoitujen säiliöiden B1-B4 sähkölämmittimien kysyntäjoustopotentiaaliin.

6 Case: Pohjaöljysäiliö T47 ja taajuusohjattu käyttöreservi

Varastosäiliöiden sähkölämmittimien soveltuvuuksia eri kysyntäjoustomarkkinoille tutkittaessa on välttämätöntä laskea säiliöiden lämpöhäviöitä erilaisissa tilanteissa, jotta säätö on mahdollista toteuttaa siten, ettei siitä ole haittaa prosessille. Tässä kappaleessa tutkitaan säiliön T47 soveltuvuutta Fingridin taajuusohjatun käyttöreservin (FCR-N) kysyntäjoustomarkkinalle ottaen huomioon markkinalta saatavat tulot ja vaaditut investoinnit. Kyseinen markkinapaikka valittiin tutkimuksen kohteeksi sen perusteella, että markkinan korvaustaso on parempi verrattuna muihin kysyntäjoustomarkkinoihin, mikä johtuu siitä, että taajuusohjatun käyttöreservin tekniset vaatimukset ovat kysyntäjoustomarkkinoista haastavimmat. Lisäksi kappaleessa pyritään huomioimaan mahdollisuuksien mukaan vuonna 2018 tapahtuvat pohjaöljyketjun ajotapamuutokset.

6.1 Lämpöhäviölaskelmat säiliölle T47

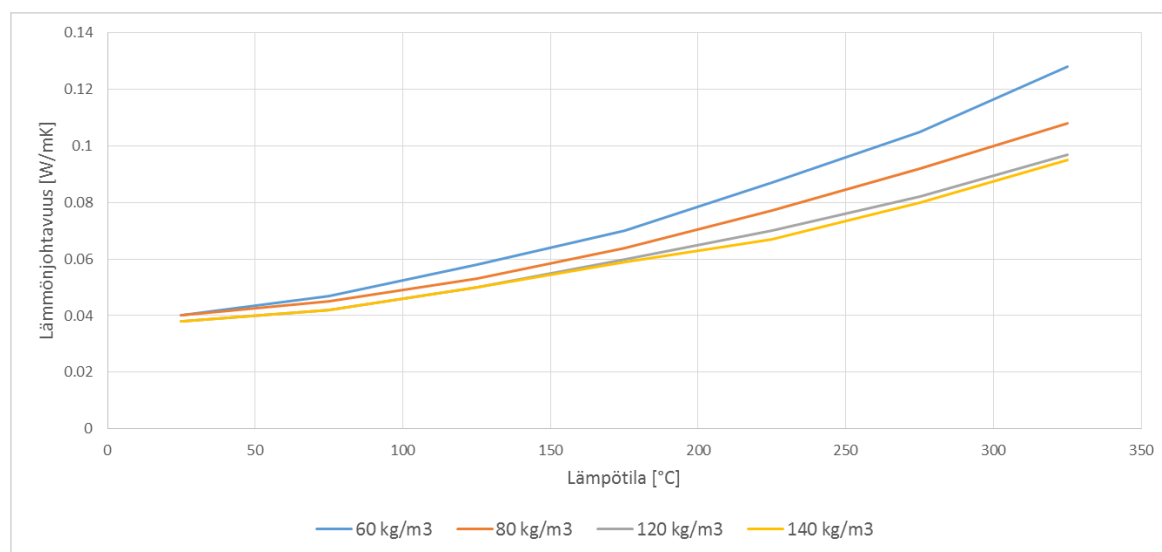
Säiliön T47 lämpöhäviöt on laskettu lämpöresistanssimenetelmällä, joka kuvaa materiaalin kykyä vastustaa lämmön siirtymistä korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan. Lämpöhäviötä on laskettu erilaisissa sääolosuhteissa ja ajotilanteissa pohjautuen tiettyihin oletuksiin ja tuloksia on verrattu saatavilla olevaan mitattuun dataan säiliön uppokuumentimen tehosta ja säiliön sisä- ja ulkolämpötiloista. Kuvassa 25 on esitetty perustietoja säiliöstä T47.



Kuva 25 Säiliön T47 mittoja ja eristepaksuuksia [106]

6.1.1 Lämpöhäviölaskelmien lähtötiedot

Säiliön T47 rakenne vaikuttaa merkittävästi lämpöhäviöihin. Kuvassa 25 on esitetty säiliön perusmitat, joista eristepaksuudet ovat lämpöhäviöiden kannalta merkittävimpiä. Säiliön vaipassa on eristettä 300 mm ja katossa 400 mm. Säiliön vaipan rakenne yksinkertaistettusti sisältä ulospäin on seuraava: pinnoittamaton teräslevy ($s_{Fe} = \sim 10$ mm), kivivilla ($s_{vaippa,villa} = 300$ mm, $\rho_{vaippa,villa} = 65$ kg/m³) ja PVC-pinnoitettu sinkitty pelti ($s_{Fe} = \sim 0,6$ mm, $s_{PVC} = \sim 0,1$ mm, emissiivisyys $\epsilon_{PVC} = 0,92$). Säiliön katon rakenne on muuten sama kuin vaipan, mutta katossa kivivillaa on 400 mm ja sen tiheys on 125 kg/m³. [107, 108, 109] Materiaalien paksuudet, tiheydet, lämmönjohtavuudet ja ominaislämpökapasiteetit on listattu taulukossa 11. Kivivillan lämmönjohtavuus kasvaa lämpötilan kasvaessa kuvan 26 mukaisesti. Lämpöhäviölaskuissa on käytetty lämmönjohtavuutta mitoituslämpötilassa 180 °C.



Kuva 26 Kivivillan lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona [110]

Taulukko 11 Säiliön T47 rakennusmateriaalien, pohjaöljyn ja typen ominaisuuksia [99, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118]

Materiaali	Paksuus, s [m]	Tiheys, ρ [kg/m ³]	Lämmönjohtavuus, λ [W/mK]	Ominaislämpökapasiteetti, c_p [kJ/kgK]
Teräslevy, Fe	0,01	7870	73	0,45
Kivivilla vaipassa	0,3	65	0,07 (180 °C)	0,84
Kivivilla katossa	0,4	125	0,06 (180 °C)	0,84
Pelti, Fe	0,0006	7870	73	0,45
Pinnoite, PVC	0,0001	1390	0,19	0,88
Pohjaöljy	-	1020	-	2,03 (170 °C)
Typpi, N ₂	-	0,762 (170 °C)	-	1,039 (170 °C)

Säiliön lämpöhäviölaskussa tehdyt oletukset ovat:

- Säiliö on tasapainotilanteessa eikä säiliön pohjaöljyn tilavuus muutu tarkastelun aikana
- Säiliö on sylinteri, jonka katto on pallon muotoinen
- Säiliön vaipan lämmönsiirto tapahtuu yksidimensionaalisesti säteen suuntaisesti

- Säiliön perustusten ja katon lämmönsiirto tapahtuu yksidimensionaalisesti kohtisuoraan pintaa vastaan
- Eristys ja muut rakenteet ovat samanlaisia koko tarkasteltavalla osalla
- Lämmönsiirto tapahtuu säiliön sisäpinnalla konvektiolla, rakenteessa johtumalla ja ulkopinnalla konvektiolla ja säteilyllä
- Typen virtaamaa säiliöön ei huomioida säiliön energiataseessa
- Säiliön typen lämpötila on dataan perustuen oletettu olevan 8 °C pienempi kuin pohjaöljyn lämpötila
- Säiliön eristeiden kunnon heikentymistä rakennusvuoden 1987 jälkeen ei ole huomioitu laskuissa
- Kylmäsillat eli ne vaipan kohdat, joista vuotaa enemmän lämpöä ulos verrattuna ympäröivään rakenteeseen, on jätetty laskuissa huomioimatta. Kylmäsillat ovat muun muassa eri rakenteiden liitoskohdat ja säiliön luukut

6.1.2 Säiliön energiatase tasapainotilanteessa

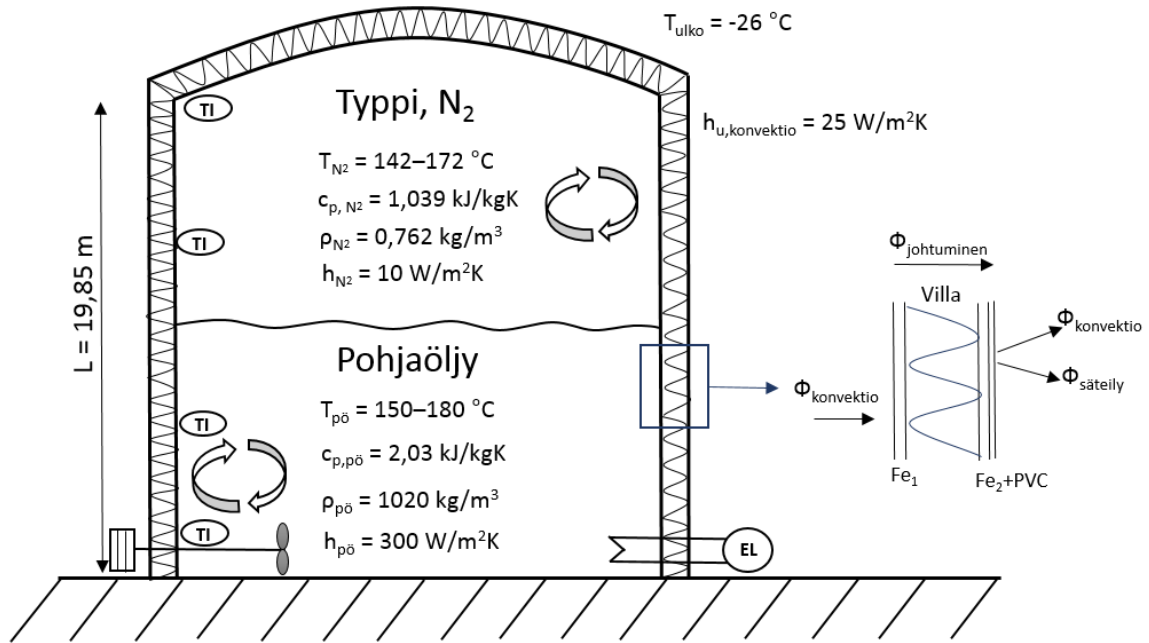
Tasapainotilanteessa, jossa säiliön sisälämpötila säilyy muuttumattomana, pätee yhtälö:

$$P_{uk} + P_{a,sekoittaja} = \phi_{häviöt} = \phi_{vaippa} + \phi_{katto} + \phi_{pohja} \quad (1)$$

jossa

P_{uk}	uppokuumentimen pätöteho, [W]
$P_{a,sekoittaja}$	sekoittajan akseliteho, [W]
$\phi_{häviöt}$	säiliön lämpöhäviöt, [W]
ϕ_{vaippa}	lämpövirta säiliön vaipan läpi, [W]
ϕ_{katto}	lämpövirta säiliön katon läpi, [W]
ϕ_{pohja}	lämpövirta säiliön pohjan läpi, [W]

Lämpöhäviöt koostuvat konvektiosta, johtumisesta ja säteilystä. Häviöitä tapahtuu säiliön pohjan kautta maaperään sekä vaipan ja katon kautta ympäröivään ilmaan. Lämpöhäviölaskelmien kannalta tehty säiliöluonnos on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27 T47 säiliöluonnos lämpöhäviölaskelmien näkökulmasta mitoitustilanteessa talviolosuhteissa

Lämpöhäviöt mitoitustilanteessa lasketaan ulkolämpötilalla -26 °C ja pohjaöljyn lämpötilalla 180 °C, jolloin typen lämpötila voidaan mittauksiin perustuen olettaa olevan 172 °C. Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin säiliön sisäpinnan ja pohjaöljyn välillä on oletettu olevan 300 W/m²K ja typen ja säiliön sisäpinnan välillä 10 W/m²K. Säiliön ulkopinnan ja ilman välinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin on tuulen vaikutuksesta oletettu olevan 25 W/m²K. [119] Normaalioperoinnissa säiliön T47 pohjaöljyn pinta vaihtelee 1,9–19,25 metrin välillä.

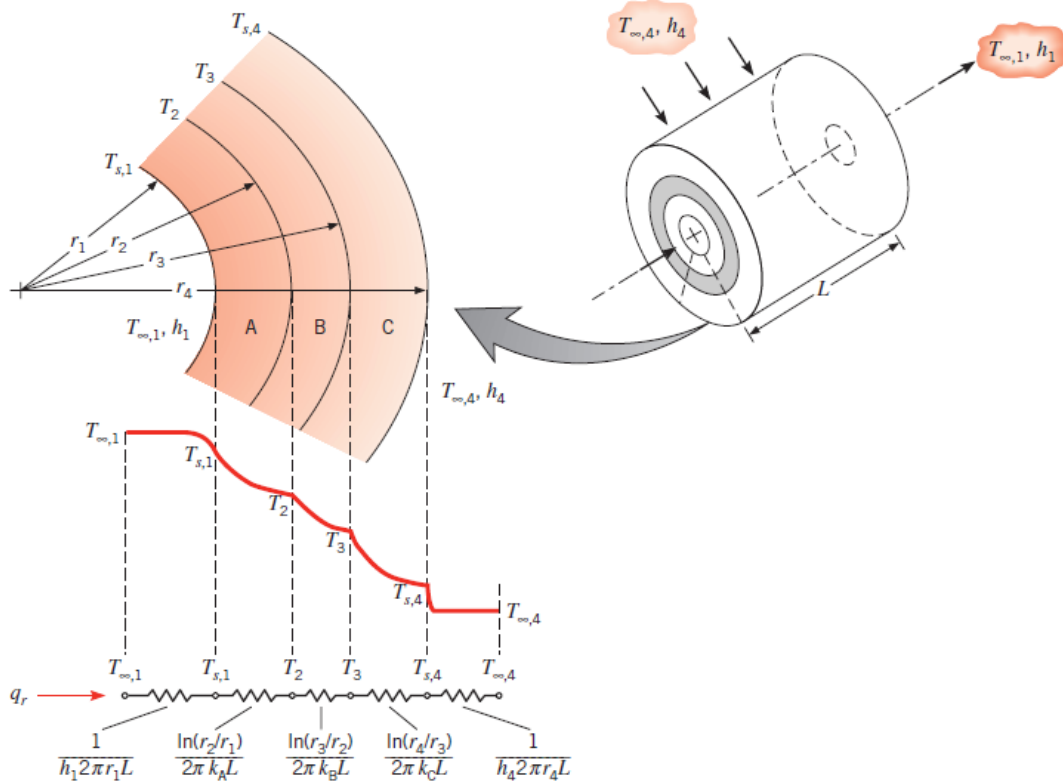
6.1.3 Säiliön vaipan lämpöhäviöt

Säiliön seinät koostuvat useista eri materiaaleista, joissa lämpö siirtyy eri tavoilla. Lämpövirta sylinterinmuotoisen vaipan läpi voidaan laskea kaavalla (2) [120]:

$$\phi_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \lambda_A L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi \lambda_B L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi \lambda_C L} + \frac{1}{2\pi r_4 L h_4}} \quad (2)$$

jossa kuvan 28 mukaisesti

ϕ_r	lämpövirta sylinterinmuotoisen vaipan läpi, [W]
$T_{\infty,1}$	säiliön sisälämpötila, [K]
$T_{\infty,4}$	ympäristön lämpötila, [K]
L	säiliön vaipan pituus, [m]
h_1	säiliön sisäpinnan lämmönsiirtokerroin, [W/m²K]
h_2	säiliön ulkopinnan lämmönsiirtokerroin, [W/m²K]
λ_n	materiaalin n lämmönjohtavuus, [W/mK]
r_1	säiliön sisäsäde, [m]
r_n	säiliön keskipisteen etäisyys materiaalin n ulkoreunasta, [m]



Kuva 28 Sylinterinmuotoisen seinän lämpötilajakauma [120]

Kaavassa (2) osoittaja kuvaa lämpötilaeroa ja nimittäjä kokonaislämpöresistanssia rakenteen yli. Kokonaislämpövirta säiliön ulkopinnasta ympäröivään ilmaan koostuu konvektiosta ja säteilystä:

$$\phi_{ulkopinta} = h_{u,konvektio} A (T_{ulkopinta} - T_{ulko}) + \varepsilon_{PVC} \sigma A (T_{ulkopinta}^4 - T_{ulko}^4) \quad (3)$$

$$\phi_{ulkopinta} = h_{kok} A (T_{ulkopinta} - T_{ulko}) \quad (4)$$

missä

$\phi_{ulkopinta}$	lämpövirta säiliön ulkopinnasta ympäristöön, [W]
$h_{u,konvektio}$	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin säiliön ulkopinnalla, [W/m ² K]
A	ulkopinnan pinta-ala, [m ²]
$T_{ulkopinta}$	säiliön ulkopinnan lämpötila, [K]
T_{ulko}	säiliötä ympäröivän ulkoilman lämpötila, [K]
ε_{PVC}	säiliön ulkopinnan emissiivisyys
σ	Stefan-Boltzmannin vakio, $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m ² K ⁴]
h_{kok}	kokonaislämmönsiirtokerroin säiliön ulkopinnalla, [W/m ² K]

Kokonaislämmönsiirtokerroin säiliön ulkopinnalla on siten [121]:

$$h_{kok} = h_{u,konvektio} + \frac{\varepsilon \sigma (T_{ulkopinta}^4 - T_{ulko}^4)}{T_{ulkopinta} - T_{ulko}} \approx h_{u,konvektio} + 4\varepsilon \sigma T_{uu}^3 \quad (5)$$

jossa

$$T_{uu} = \frac{1}{2}(T_{ulkopinta} + T_{ulko}) \quad (6)$$

Säiliön T47 ulkopinnasta voidaan 25.1.2018 infrapunalämpömittarilla tehtyjen mittausten perusteella virherajat huomioon ottaen todeta, että säiliön ulkopinnan lämpötila on likimain sama kuin ympäröivän ulkoilman lämpötila. Tällöin kaava (6) yksinkertaistuu muotoon:

$$T_{uu} \approx T_{ulko} \quad (7)$$

$$h_{kok} \approx h_{u,konvektio} + 4\varepsilon\sigma T_{ulko}^3 \quad (8)$$

$$h_{kok} \approx 25 \frac{W}{m^2K} + 4 \cdot 0,92 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4} \cdot (247,15 K)^3 \approx 28,15 \frac{W}{m^2K}$$

Säiliön pohjaöljyn pinnankorkeus, joka vaikuttaa säiliön sisäpinnan lämmönsiirtokertoimeen, vaihtelee normaalioperoinnissa huomattavasti ja tällöin osa säiliön sisäpinnan vaipan alasta on tyypeä ja osa pohjaöljyä.

$$L = H_{pö} + H_{N_2} \quad (9)$$

$$H_{N_2} = L - H_{pö} \quad (10)$$

Kaavoista (2) ja (8) saadaan säiliön T47 vaipan pohjaöljyosan lämmönsiirtoteholle pätevä yhtälö:

$$\phi_{vaippa,pö} = \frac{T_{pö} - T_{ulko}}{\frac{1}{2\pi r_{sisä} H_{pö} h_{pö}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{Fe1}}{r_{sisä}}\right)}{2\pi\lambda_{Fe} H_{pö}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{villa}}{r_{Fe1}}\right)}{2\pi\lambda_{villa} H_{pö}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{Fe2}}{r_{villa}}\right)}{2\pi\lambda_{Fe} H_{pö}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{PVC}}{r_{Fe2}}\right)}{2\pi\lambda_{PVC} H_{pö}} + \frac{1}{2\pi r_{PVC} H_{pö} h_{kok}}} \quad (11)$$

Toisaalta lämpövirta säiliön vaipan kaasuosan läpi on:

$$\phi_{vaippa,N_2} = \frac{T_{N_2} - T_{ulko}}{\frac{1}{2\pi r_{sisä} H_{N_2} h_{N_2}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{Fe1}}{r_{sisä}}\right)}{2\pi\lambda_{Fe} H_{N_2}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{villa}}{r_{Fe1}}\right)}{2\pi\lambda_{villa} H_{N_2}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{Fe2}}{r_{villa}}\right)}{2\pi\lambda_{Fe} H_{N_2}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{PVC}}{r_{Fe2}}\right)}{2\pi\lambda_{PVC} H_{N_2}} + \frac{1}{2\pi r_{PVC} H_{N_2} h_{kok}}} \quad (12)$$

Vaipan kokonaislämpöhäviöt ovat siis:

$$\phi_{vaippa} = \phi_{vaippa,pö} + \phi_{vaippa,N_2} \quad (13)$$

Mitoitustilanteessa, kun säiliössä on pohjaöljyä 19,25 metriä, vaipan pohjaöljyosan kautta tapahtuvat lämpöhäviöt ovat (kaava 11):

$$\begin{aligned} & \phi_{vaippa,pö} \\ &= \frac{(180 - (-26))K}{\frac{1}{2\pi \cdot 13m \cdot 19,25m \cdot 300 \frac{W}{m^2K}} + \frac{\ln\left(\frac{13,01m}{13m}\right)}{2\pi \cdot 73 \frac{W}{mK} \cdot 19,25m} + \frac{\ln\left(\frac{13,31m}{13,01m}\right)}{2\pi \cdot 0,07 \frac{W}{mK} \cdot 19,25m} + \frac{\ln\left(\frac{13,3106m}{13,31m}\right)}{2\pi \cdot 73 \frac{W}{mK} \cdot 19,25m} + \frac{\ln\left(\frac{13,3107m}{13,3106m}\right)}{2\pi \cdot 0,19 \frac{W}{mK} \cdot 19,25m} + \frac{1}{2\pi \cdot 13,3107m \cdot 19,25m \cdot 28,15 \frac{W}{m^2K}}} \end{aligned}$$

$$\approx 75,8 kW$$

Samalla säiliön vaipan kaasuosan lämpöhäviöteho on (kaava 12):

$$\Phi_{vaippa, N_2} = \frac{(172 - (-26))K}{\frac{1}{2\pi \cdot 13m \cdot 0,6m \cdot 10 \frac{W}{m^2K}} + \frac{\ln\left(\frac{13,01m}{13m}\right)}{2\pi \cdot 73 \frac{W}{mK} \cdot 0,6m} + \frac{\ln\left(\frac{13,31m}{13,01m}\right)}{2\pi \cdot 0,07 \frac{W}{mK} \cdot 0,6m} + \frac{\ln\left(\frac{13,3106m}{13,31m}\right)}{2\pi \cdot 73 \frac{W}{mK} \cdot 0,6m} + \frac{\ln\left(\frac{13,3107m}{13,3106m}\right)}{2\pi \cdot 0,19 \frac{W}{mK} \cdot 0,6m} + \frac{1}{2\pi \cdot 13,3107m \cdot 0,6m \cdot 28,15 \frac{W}{m^2K}}}$$

$$\approx 2,2 \text{ kW}$$

6.1.4 Säiliön pohjan lämpöhäviöt

Säiliön pohjan lämpöhäviöt on laskettu tarkemman tiedon puuttuessa Ympäristöministeriön uuden rakennuksen energiatehokkuusasetuksen mukaisesti, missä on ilmoitettu maata vasten olevan rakennusosan lämmönläpäisykerroimeksi $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ [122]. Maanvastaisen alapohjan kautta maahan johtuva energia lasketaan kaavalla:

$$\Phi_{pohja} = UA_{pohja}(T_{pö} - T_{maa}) \quad (14)$$

jossa

Φ_{pohja}	lämpövirta säiliön pohjan läpi, [W]
U	lämmönläpäisykerroin säiliön pohjan läpi, [$\text{W/m}^2\text{K}$]
A_{pohja}	säiliön pohjan pinta-ala, [m^2]
$T_{pö}$	säiliön pohjaöljyn ja myös pohjan sisälämpötila, [$^{\circ}\text{C}$]
T_{maa}	säiliön alapuolisen maan lämpötila, [$^{\circ}\text{C}$]

Säiliön alapohjan alapuolisen maan vuotuinen keskilämpötila saadaan kaavalla (15) [123]:

$$T_{maa, vuosi} = T_{u, vuosi} + \Delta T_{maa, vuosi} \quad (15)$$

jossa

$T_{maa, vuosi}$	säiliön alapuolisen maan vuotuinen keskilämpötila, [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{u, vuosi}$	ulkoilman vuotuinen keskilämpötila, [$^{\circ}\text{C}$]
$\Delta T_{maa, vuosi}$	alapohjan alapuolisen maan ja ulkoilman vuotuisen keskilämpötilan ero, [$^{\circ}\text{C}$]

Maan ja ulkoilman vuotuisen keskilämpötilan erona käytetään arvoa 5°C . Kuukausittainen keskilämpötila säiliön alapuolella voidaan laskea kaavalla (16) [123]:

$$T_{maa, kuukausi} = T_{maa, vuosi} + \Delta T_{maa, kuukausi} \quad (16)$$

jossa

$T_{maa, kuukausi}$	säiliön alapuolisen maan kuukausittainen keskilämpötila, [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{maa, vuosi}$	säiliön alapuolisen maan vuotuinen keskilämpötila, [$^{\circ}\text{C}$]
$\Delta T_{maa, kuukausi}$	säiliön alapuolisen maan kuukausittaisen ja vuotuisen keskilämpötilan ero (taulukko 12), [$^{\circ}\text{C}$]

Taulukko 12 Säiliön alapuolisen maan kuukausittaisen keskilämpötilan ja vuotuisen keskilämpötilan ero [123]

Kuukausi	$\Delta T_{maa,kuukausi}$ [°C]
Tammikuu	0
Helmikuu	– 1
Maaliskuu	– 2
Huhtikuu	– 3
Toukokuu	– 3
Kesäkuu	– 2
Heinäkuu	0
Elokuu	1
Syyskuu	2
Lokakuu	3
Marraskuu	3
Joulukuu	2

Ilmatieteenlaitoksen mukaan vuosien 1981–2010 keskilämpötila Vantaalla on ollut 5,2 °C, jonka voidaan olettaa kuvaavan riittävällä tarkkuudella myös Porvoon vuotuista keskilämpötilaa. Yhdistämällä kaavat (15) ja (16) saadaan:

$$T_{maa,kuukausi} = T_{u,vuosi} + \Delta T_{maa,vuosi} + \Delta T_{maa,kuukausi} \quad (17)$$

Mitoitustilanteessa helmikuussa säiliön alapuolisen maan lämpötila on siten:

$$T_{maa,helmikuu} = 5,2 \text{ °C} + 5 \text{ °C} + (-1 \text{ °C}) = 9,2 \text{ °C}$$

Säiliön pohjan kautta tapahtuvat lämpöhäviöt mitoitustilanteessa ovat:

$$\begin{aligned} \phi_{pohja} &= UA_{pohja}(T_{pö} - T_{maa}) = U\pi r^2(T_{pö} - T_{maa}) \\ &= 0,16 \frac{W}{m^2K} \cdot \pi(13,3107 \text{ m})^2 \cdot (180 - 9,2)K \approx \mathbf{15,2 \text{ kW}} \end{aligned}$$

6.1.5 Säiliön katon lämpöhäviöt

Säiliön katto on yksinkertaisuuden vuoksi oletettu levymäiseksi, jossa lämpöhäviöt tapahtuvat yksidimensionaalisesti. Lämpövirta katon läpi voidaan laskea kaavalla:

$$\phi_{katto} = \frac{T_{N_2} - T_{ulko}}{\frac{1}{h_{N_2}A_k} + \frac{S_{Fe_1}}{\lambda_{Fe}A_k} + \frac{S_{villa}}{\lambda_{villa}A_k} + \frac{S_{Fe_2}}{\lambda_{Fe}A_k} + \frac{S_{PVC}}{\lambda_{PVC}A_k} + \frac{1}{h_{kok}A_k}} \quad (18)$$

jossa

ϕ_{katto}	lämpövirta säiliön katon läpi, [W]
T_{N_2}	säiliön kaasuosan lämpötila, [°C]
T_{ulko}	ympäristön lämpötila, [°C]
h_{N_2}	säiliön katon sisäpinnan lämmönsiirtokerroin, [W/m ² K]
A_k	pallonmuotoisen katon pinta-ala, [m ²]

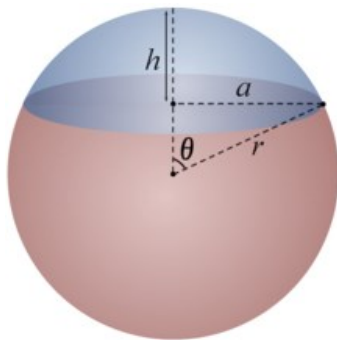
s_n	materiaalin n paksuus, [m]
λ_n	materiaalin n lämmönjohtavuus, [W/mK]
h_{kok}	säiliön ulkopinnan lämmönsiirtokerroin, [W/m ² K]

Pallonmuotoisen katon pinta-ala voidaan laskea kaavalla (19) kuvan 29 mukaisesti [124]:

$$A_k = 2\pi r h \quad (19)$$

jossa

r	säiliön katon muodostaman pallon säde, [m]
h	säiliön katon korkeus mitattuna vaipan yläreunasta, [m]



Kuva 29 Säiliön kattoa kuvaava pallon osuus kuvassa sinisellä [124]

Säiliön katon pinta-ala on yhtälön (19) mukaisesti:

$$A_k = 2\pi r h = 2\pi \cdot 39\text{m} \cdot 2,4\text{m} \approx 588,1\text{ m}^2$$

Säiliön katon kautta tapahtuvat lämpöhäviöt mitoitustilanteessa ovat (kaava 18):

$$\begin{aligned} \phi_{\text{katto}} &= \frac{(172 - (-26))K}{\frac{1}{10 \frac{W}{m^2K} \cdot 588,1m^2} + \frac{0,01m}{73 \frac{W}{mK} \cdot 588,1m^2} + \frac{0,4m}{0,06 \frac{W}{mK} \cdot 588,1m^2} + \frac{0,0006m}{73 \frac{W}{mK} \cdot 588,1m^2} + \frac{0,0001m}{0,19 \frac{W}{mK} \cdot 588,1m^2} + \frac{1}{28,15 \frac{W}{m^2K} \cdot 588,1m^2}} \\ &\approx 17,1\text{ kW} \end{aligned}$$

6.1.6 Säiliön uppokuumentimen ja sekoittajan vaikutus energiataseeseen

Säiliön T47 uppokuumentimen (EA-4201AL) ja sekoittajan (TGD47A) käytön todellinen tehonkulutus ja niiden vaikutus säiliön energiataseeseen selvitettiin kenttämittauksin muuntamalla, josta lähtee sähkösyötöt kyseisiin laitteisiin. Mittaukset suoritettiin FLUKE 381 Remote Display TRMS Clamp Meter:llä, jonka tarkkuus on $\pm 3,5\%$ [125]. Uppokuumentimen todellinen maksimiteho kertoo lisäksi, kuinka paljon tältä joustokohteelta on teoriassa mahdollista tarjota reservikapasiteettia eri kysyntäjoustomarkkinoille. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13 Säiliön T47 uppokuumentimen tehomittaustulokset 22.2.2018

22.2.2018 klo	Uppokuu- mentimen teho [%]	Uppokuumentimen mitattu virta I [A]	Sekoittajan mi- tattu virta I [A]	Mitattu jännite U [V]
12:25	33	179	50	387
12:31	100	510	50	387
12:36	87	420	50	387
12:39	58	290	50	387
12:51	30	169	50	387
12:55	0	0	50	387

Käytetty mittari laski automaattisesti vaihtovirrasta tasavirtaa vastaavan arvon. Koska mitattava kohde oli kolmivaihevirtaa ja jännite pystyttiin myös mittaamaan, voidaan uppokuumentimen pätötehon kulutus laskea kaavalla (20). [126, 127]

$$P_{uk} = \sqrt{3}U_{uk}I_{uk} \quad (20)$$

jossa

P_{uk} uppokuumentimen pätöteho, [W]
 U_{uk} uppokuumentimen jännite, [V]
 I_{uk} uppokuumentimen sähkövirta, [A]

Taulukkoon 14 on laskettu mittauksien perusteella ja yhtälön (20) avulla T47 uppokuumentimen ja sekoittajan hetkittäiset pätötehot.

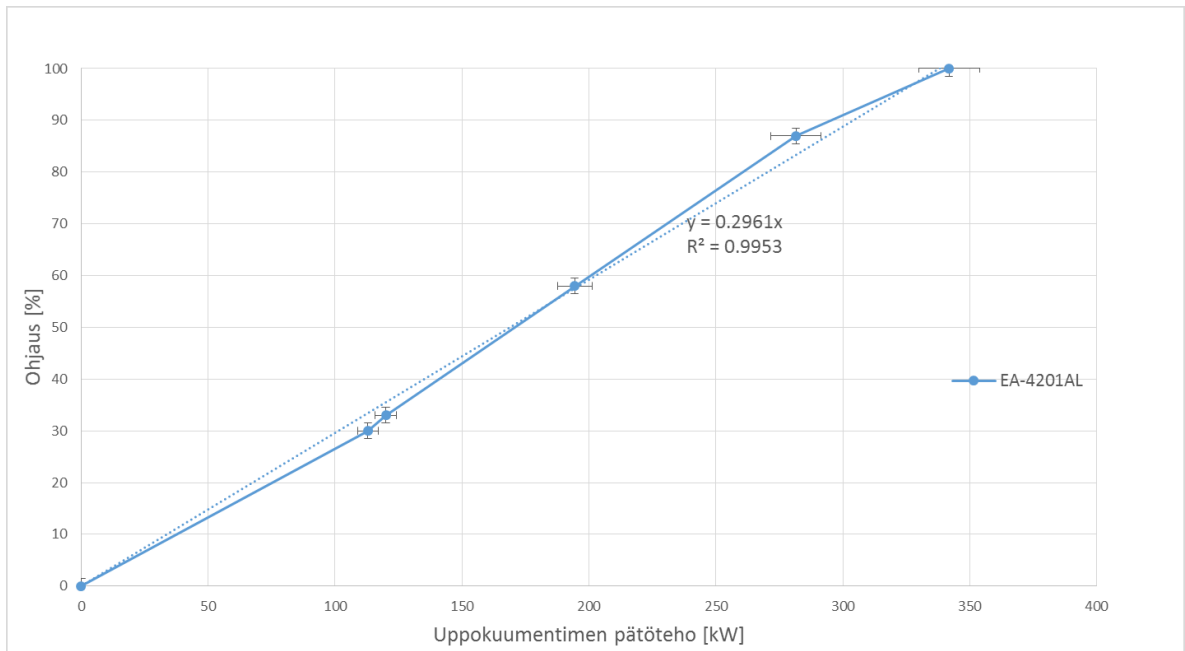
Taulukko 14 Säiliön T47 uppokuumentimen ja sekoittajan todelliset tehonkulutukset

Uppokuumentimen teho [%]	Uppokuumentimen pätöteho [kW]	Sekoittajan pätöteho [kW]
0	0	33,5
30	113	33,5
33	120	33,5
58	194	33,5
87	282	33,5
100	342	33,5

Sekoittajan akseliteho, jonka oletetaan muuttuvan säiliössä lopulta lämmöksi, on laskettu olettaen sekoittajan moottorin hyötysuhteeksi 0,86.

$$P_{a,sekoittaja} = \eta P_{sekoittaja} = 0,86 \cdot 33,5 \text{ kW} \approx 28,8 \text{ kW}$$

Kuvassa 30 on kuvattu automaatiojärjestelmässä näkyvän uppokuumentimen ohjauksen prosentuaalisen tehon ja uppokuumentimen pätötehon suhde.



Kuva 30 Uppokuumentimen ohjauksen suhde pätötehoon

Uppokuumentimen ohjaustehoprosentin voidaan siten olettaa seuraavan yhtälöä (21).

$$y = 0,2961x \quad (21)$$

jossa

y ohjausteho, [%]
x uppokuumentimen pätöteho, [kW]

6.1.7 Yhteenveto säiliön lämpöhäviöistä mitoitustilanteessa ja lämpötilajakaumat rakenteiden yli

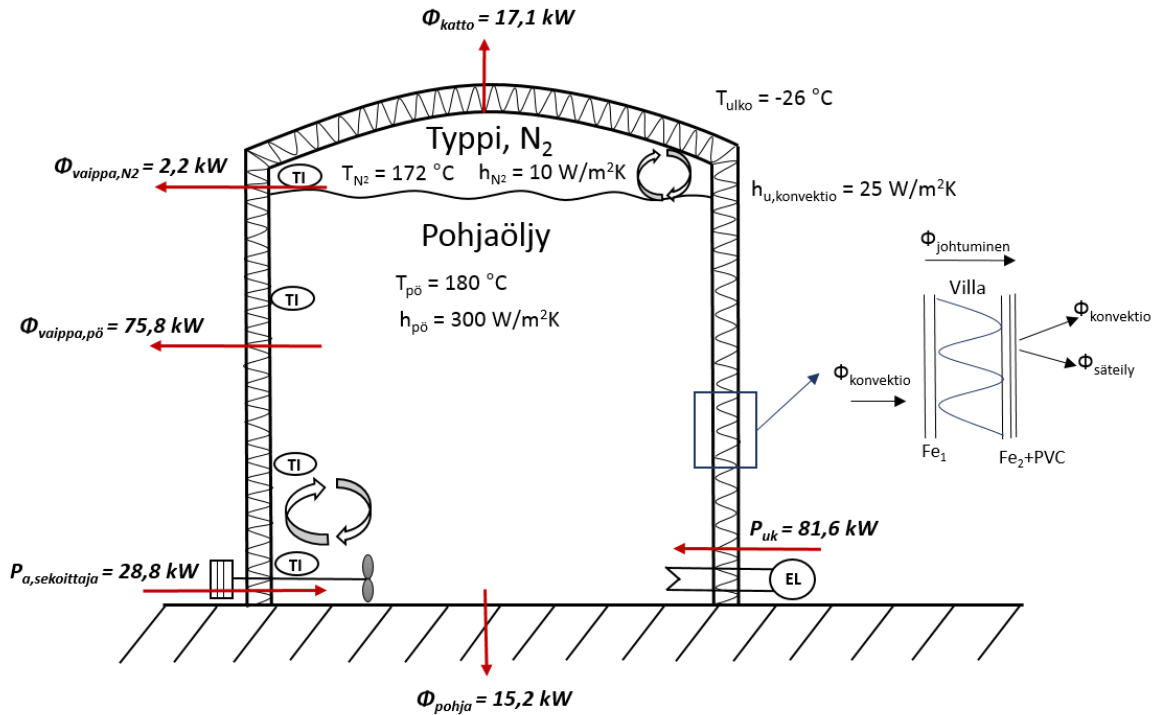
Mitoitustilanteen laskennalliset lämpöhäviöt yhtälöiden (1) ja (13) mukaisesti ovat:

$$\phi_{\text{häviöt}} = \phi_{\text{vaippa,pö}} + \phi_{\text{vaippa,N}_2} + \phi_{\text{katto}} + \phi_{\text{pohja}} \approx 110,4 \text{ kW}$$

Toisaalta tasapainotilanteessa uppokuumentimelta vaadittava teho on:

$$P_{uk} = \phi_{\text{häviöt}} - P_{a,sekoittaja} = 110,4 \text{ kW} - 28,8 \text{ kW} \approx 81,6 \text{ kW}$$

Yhteenveto mitoitustilanteen lämpöhäviöistä on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31 Yhteenvedo säiliön T47 lämpöhäviöistä mitoitusilanteessa, kun säiliö on tasapainotilassa

Lämpöresistanssimallilla on mahdollista selvittää yhtälön (22) avulla lämpötilaerot säiliön jokaisen materiaalikerroksen yli, koska lämmönsiirtoteho on vakio koko rakenteen yli [120]:

$$\phi_i = \frac{\Delta T_i}{R_i} \quad (22)$$

jossa

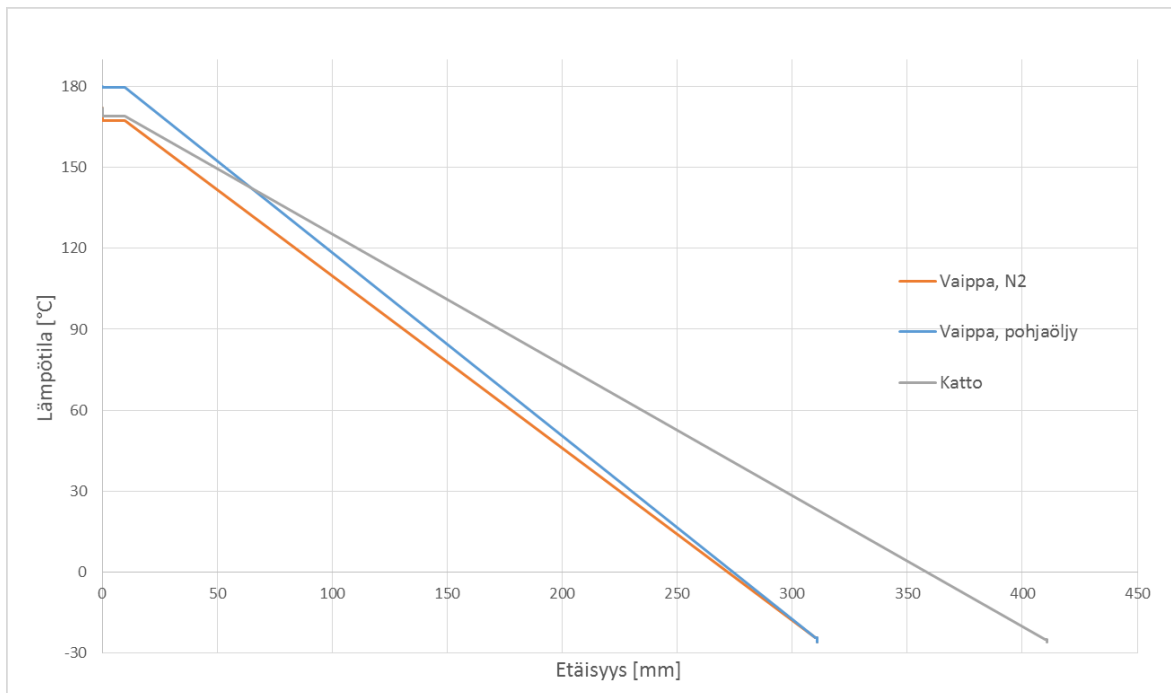
ϕ_i	lämpövirta rakenteen i yli, [W]
ΔT_i	lämpötilaero materiaalin i yli, [K]
R_i	materiaalin tai rajapinnan i lämpöresistanssi, [K/W]

Jokainen materiaali ja rajapinta vastustavat lämmönsiirtoa eri tavoin kuvan 28 mukaisesti. Esimerkiksi lämpötilaero kivivillan yli vaipan kaasuosassa ja ulkoilman ja säiliön ulkopinnan välinen lämpötilaero voidaan laskea kaavan (22) avulla.

$$\begin{aligned} \Delta T_{villa} &= \phi_{vaippa,N_2} R_{villa} = \phi_{vaippa,N_2} \cdot \frac{\ln\left(\frac{r_{villa}}{r_{Fe1}}\right)}{2\pi\lambda_{villa}H_{N_2}} \\ &= 2220,9 \text{ W} \cdot \frac{\ln\left(\frac{13,31\text{m}}{13,01\text{m}}\right)}{2\pi \cdot 0,07 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 0,6\text{m}} \approx 191,9 \text{ °C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{ulko} &= \phi_{vaippa,N_2} R_{ulko} = \phi_{vaippa,N_2} \cdot \frac{1}{2\pi r_{PVC} H_{N_2} h_{kok}} \\ &= 2220,9 \text{ W} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot 13,3107\text{m} \cdot 0,6\text{m} \cdot 28,15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} \approx 1,6 \text{ °C} \end{aligned}$$

Säiliön kaasuosan ulkopinnan ja ympäristön lämpötilan välinen ero on vain 1,6 °C, joten kappaleessa 6.1.3 tehty oletus voidaan hyväksyä. Merkittävin lämpötilaero on villan yli, koska konduktio villan yli on kontrolloiva lämpöresistanssi 96,9 %:n osuudella kokonaisresistanssista. Koska villa määrittää vahvasti lämpöhäviöiden suuruuden, laskuissa käytetyt oletetut konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet eivät merkittävästi vaikuta lämpöhäviöiden suuruuteen. Siten todellisten lämmönsiirtokertoimien selvittäminen ei toisi merkittävää lisähyötyä lämpöhäviölaskelmaan. Kuvassa 32 on esitetty lämpötilajakaumat sisältä ulospäin säiliön vaipan ja katon yli. Suurin lämpötilaero syntyy aina kivivillan vaikutuksesta.



Kuva 32 Lämpötilajakaumat mitoitusilanteessa säiliön vaipan ja katon yli. Y-akseli kuvaa lämpötilaa ja x-akseli etäisyyttä säiliön sisäpinnasta ulkopinnalle

6.2 Historiadataan pohjautuva malli säiliön T47 lämpötiloista ja lämpötilan muutosnopeuksista

Säiliön T47 pohjaöljyn lämpötilan todellista käyttäytymistä on tutkittu olemassa olevaan historiadataan pohjautuen. Datan avulla on mahdollista selvittää luotettavammin säiliön todelliset lämpöhäviöt ja sitä kautta rakentaa luotettavampi malli pohjaöljyn lämpötilamuutoksista ja muutosnopeuksista erilaisissa tilanteissa. Siten pohjaöljyn lämpötilakäyttäytymisen pystytään ennustamaan riittävällä tarkkuudella, jotta taajuusohjatun käyttöreservin markkinalle on mahdollista osallistua. Historiadataa on olemassa ulkolämpötilasta, säiliön lämpötiloista eri antureiden mittaamina, säiliön pinnankorkeudesta ja uppokuumentimen tehosta eri ajanhetkillä.

Pohjaöljyn lämpötilamuutosta eri tilanteissa tutkitaan keskitetyn kapasitanssimetodin (Lumped Capacitance Method) avulla, jossa oletetaan säiliön lämpötilan olevan yhtenäinen ja olosuhteiden pysyvän muuttumattomina koko tarkastelujakson ajan. Pohjaöljyn lämpötilan muutosta voidaan kuvata yhtälöllä (23). [120]

$$\Delta T_{p\ddot{o}} = (T_{ka,ulko} - T_{p\ddot{o},0}) \cdot \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)}\right) \quad (23)$$

jossa

$\Delta T_{p\ddot{o}}$	pohjaöljyn lämpötilamuutos tarkastellulla ajanjaksolla, [°C]
$T_{ka,ulko}$	ulkoilman keskimääräinen lämpötila tarkastellulla ajanjaksolla, [°C]
$T_{p\ddot{o},0}$	pohjaöljyn lämpötila tarkastelujakson alussa, [°C]
t	tarkastelujakson pituus, [s]
τ	terminen aikavakio, [s]

Yhtälössä (23) esiintyvä terminen aikavakio koostuu säiliön kokonaislämpökapasiteetista ja lämmönläpäisylukujen summasta yhtälön (24) mukaisesti. Mitä suurempi kokonaislämpökapasiteetti on, sitä hitaampi on lämpötilamuutos. [120, 128]

$$\tau = \frac{C_{kok}}{G_{kok}} = \frac{\sum(\rho V c_p)_i}{\sum \frac{1}{R_i}} = \frac{\sum(\rho V c_p)_i}{\sum \frac{\phi_i}{\Delta T}} \quad (24)$$

jossa

C_{kok}	säiliön kokonaislämpökapasiteetti, [J/K]
G_{kok}	lämpökonduktanssien summa, [W/K]
ρ_i	aineen/materiaalin i tiheys, [kg/m ³]
V_i	aineen/materiaalin i tilavuus, [m ³]
$c_{p,i}$	aineen/materiaalin i ominaislämpökapasiteetti, [J/kgK]
R_i	materiaalin tai rajapinnan i lämpöresistanssi, [K/W]
ϕ_i	lämpövirta i, [W]
ΔT	säiliön sisä- ja ulkolämpötilan ero, [°C]

Aikavakio säiliölle T47 on kaavan (25) mukainen. Kaavassa (25) uppokuumentimen ja sekoittajan lämpökonduktanssit lasketaan negatiivisina, koska ne lämmittävät säiliötä, kun taas lämpöhäviöt samanaikaisesti jäädyttävät säiliötä.

$$\tau = \frac{C_{p\ddot{o}} + C_{N_2} + C_{vaippa} + C_{katto}}{G_{vaippa,p\ddot{o}} + G_{vaippa,N_2} + G_{pohja} + G_{katto} + G_{uk} + G_{sekoittaja}} \quad (25)$$

T47:n kokonaislämpökapasiteetti koostuu 95 prosenttisesti pohjaöljyn lämpökapasiteetista säiliön pinnan ollessa operointitason alarajalla ja yli 99 prosenttisesti, kun pinta on operointitason ylärajalla. Siten pohjaöljyn määrä säiliössä määrittää käytännössä säiliön lämpötilan muutosnopeuden. Kokonaislämmönläpäisyluvun etumerkin, ja sitä kautta lämpötilamuutoksen suunnan, määrittää uppokuumentimen teho.

Historiadataa hyödyntämällä on mahdollista tarkentaa mallia ja siten löytää parempi arvio todellisten lämpöhäviöiden suuruudesta. Pohjaöljyn lämpötilamuutokseen tarvittava energiamäärä voidaan laskea yksinkertaisesti yhtälöllä (26).

$$\frac{\Delta Q_{p\ddot{o}}}{\Delta t} = c_p m \Delta T = c_{p,p\ddot{o}} \rho_{p\ddot{o}} V_{p\ddot{o}} \Delta T_{p\ddot{o}} \quad (26)$$

jossa

$\Delta Q_{p\ddot{o}}$	pohjaöljyn energiamäärän muutos, [J]
------------------------	--------------------------------------

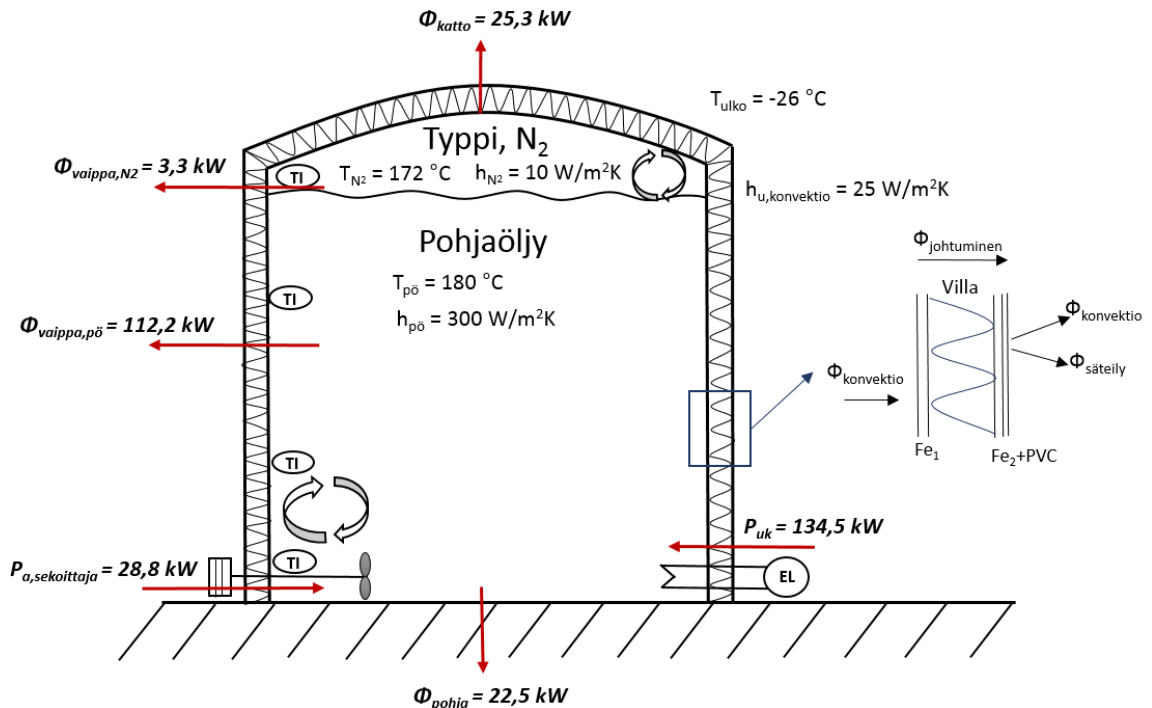
Δt	tarkastellun aikavälin pituus, [s]
$c_{p,p\ddot{o}}$	pohjaöljyn ominaislämpökapasiteetti, [J/kgK]
$\rho_{p\ddot{o}}$	pohjaöljyn tiheys, [kg/m ³]
$V_{p\ddot{o}}$	pohjaöljyn tilavuus, [m ³]
$\Delta T_{p\ddot{o}}$	pohjaöljyn lämpötilamuutos tarkasteluvälillä, [°C]

Pohjaöljyn energiamäärän muutoksen laskennassa mittausdataan pohjautuvia arvoja ovat tilavuus ja lämpötilan muutos. Säiliön T47 lämpötila-anturit ovat Rosemount 644 PT-100 antureita, joiden mittaustarkeyus on $\pm 0,15$ °C [129]. Lisäksi tilavuuden laskentaan käytettävän pinnanmittausdatan epätarkkuus aiheuttaa laskentaan virhettä. Todellisten lämpöhäviöiden suuruutta on arvioitu kaavojen (27) ja (28) avulla.

$$P_{uk} + P_{a,sekoittaja} + \phi_{häviöt} = \frac{\Delta Q_{p\ddot{o}}}{\Delta t} \quad (27)$$

$$\phi_{häviöt} = \frac{\Delta Q_{p\ddot{o}}}{\Delta t} - P_{uk} - P_{a,sekoittaja} \quad (28)$$

Säiliön lämpöhäviöt lasketaan kaavan (28) mukaisesti siten, että laskennallisesta pohjaöljyn energiamäärän muutoksesta tarkastellulla aikavälillä vähennetään tiedossa olevat keskimääräiset uppokuumentimen ja sekoittajan tehot. Erilaisia historiadatan ajanjaksoja tutkimalla ja kokeilemalla voidaan todeta, että kappaleessa 6.1. lasketut mitoituslämpöhäviöt ovat liian pienet, koska todellisuutta paremmin kuvaavat häviöt ovat noin 48 % laskettua suuremmat. Tällöin mitoitusolosuhteissa tasapainotilanteen todellinen energiatase on kuvan 33 mukainen.



Kuva 33 Säiliön T47 todelliset energiavirrat mitoitusstilanteessa, kun säiliö on tasapainotilassa

Säiliön T47 lämpötila muuttuu erilaisissa olosuhteissa eri nopeuksilla. Taulukossa 15 kuvataan pohjaöljyn lämpötilamuutosta 24h aikana lähtien alkulämpötilasta 170 °C erilaisilla uppokuumentimen tehoilla, pohjaöljytilavuuksilla ja ulkoilman lämpötiloilla. Laskennassa on oletettu näiden muuttujien pysyvän vakiona tarkastelujakson ajan. Tuloksista nähdään, että merkittävimmät lämpötilamuutokset tapahtuvat pienillä pohjaöljytilavuuksilla eli silloin, kun säiliö on melkein tyhjä. Huomionarvoista on myös, että lämpöhäviöt kasvavat ulkolämpötilan laskiessa ja nousevat hyvin maltillisesti pohjaöljytilavuuden kasvaessa. Taulukosta 15 nähdään, että pohjaöljy jäähtyy ääritapauksessakin enimmillään 4,5 °C vuorokaudessa ja lämpenee enimmillään 9,1 °C. Toisaalta auringon säteilyenergian lämmittävää vaikutusta ei ole mallissa otettu huomioon, joten on mahdollista, että kuumana kesäpäivänä pohjaöljy lämpenee mallin antamaa tulosta enemmän.

Taulukko 15 Säiliön T47 pohjaöljyn lämpötilamuutos 24h aikana eri pinnankorkeuksilla ja ulkoilman lämpötiloilla, kun pohjaöljyn lämpötila alussa on 170 °C

Säiliön T47 pinta [m]	T _{ulko} [°C]	Φ _{häviöt} [kW]	ΔT _{pö} 24h jälkeen [°C]			
			P _{uk} = 0 kW	P _{uk} = 113 kW	P _{uk} = 225 kW	P _{uk} = 338 kW
1,9	-26	149,2	-4,5	-0,6	3,3	7,4
10	-26	151,9	-1,0	-0,1	0,7	1,6
19,25	-26	155,1	-0,5	-0,1	0,4	0,8
1,9	0	131,5	-3,8	-0,1	4,1	8,2
10	0	134,2	-0,8	0	0,9	1,7
19,25	0	137,2	-0,4	0	0,5	0,9
1,9	30	111,2	-2,9	1,0	5,0	9,1
10	30	113,7	-0,6	0,2	1,1	1,9
19,25	30	116,6	-0,3	0,1	0,6	1,0

6.3 Taajuusohjatun käyttöreservin (FCR-N) tuottopotentiali

Taajuusohjatun käyttöreservin (FCR-N) tuottopotentialia on tutkittu vuosina 2013–2017 ja samalla on analysoitu toteutuneiden kauppantuntien määriä ja historiataajuusdataan nojautuen sitä, kuinka paljon kauppantunneista on ollut ylössäätöä verrattuna alassäätöön. Lisäksi säiliölle T47 on laskettu erilaisten tarjousmallien tuottopotentialiaa vuodelle 2017, jos se olisi ollut liitettyä taajuusohjattuun käyttöreserviin. Säästöpotentialia T47:lle on tutkittu myös edullisemman yösähkön hyödyntämisellä tilanteessa, jossa säiliötä olisi lämmitetty vain klo 21:00–07:00 välisenä aikana ja annettu pohjaöljyn lämpötilan laskea päivän aikana.

6.3.1 FCR-N yhteenveto 2013–2017

Taajuusohjatun käyttöreservin tuottopotentialia on analysoitu vuosina 2013–2017 Fingridin Avoimen datan ja Nesteen oman taajuusmittausdatan pohjalta. Tuottopotentialin osalta on laskettu vain taajuusohjatun käyttöreservin markkinalta maksetut kapasiteettikorvaukset jättäen huomioimatta tasevastaavalle maksettava energiakorvaus. Taulukosta 16 nähdään, kuinka suurella osuudella vuoden tunneista taajuusohjatun käyttöreservin tuntimarkkinoilla on käyty kauppaa ja kuinka paljon näistä tunneista on ollut ylös- ja alassäätöä. Vuoden 2013 taajuusdataa oli saatavilla vain huhti-joulukuulle, joten kyseisen vuoden todellinen yli- ja alitaajuustuntien suhde voi hieman poiketa taulukossa esitetystä. Huomionarvoista on, että

vuonna 2017 kauppaa on käyty tuntimarkkinoilla lähes jokaisella vuoden tunnilla ja vuosina 2013–2017 alas- ja ylössäätöä on tapahtunut vuosittain melkein yhtä paljon. Ylössäätöjä on vuosittain tehty 50,3–54,1 % kauppatusunneista tarkoittaen sitä, että keskimäärin sähköverkoissa on ollut hieman useammin alitaajuutta kuin ylitaajuutta.

Taulukko 16 Taajuusohjatun käyttöreservin kaupankäyntiä vuosina 2013–2017 [130, 131]

Vuosi	Kaupankäyntituntien osuus vuoden tunneista [%]	Tunnit ilman kaupankäyntiä [%]	Alassäätöä [%]	Ylössäätöä [%]
2013	71,6	28,4	47,6	52,4
2014	69,6	30,4	45,9	54,1
2015	77,4	22,6	48,2	51,8
2016	64,5	35,5	49,6	50,4
2017	98,9	1,1	49,7	50,3

Taulukosta 17 nähdään taajuusohjatun käyttöreservin tunti- ja vuosimarkkinoiden korvaustasojen kehitys vuosina 2013–2017. Tuntimarkkinoilla korvaustaso on madaltunut vuosien varrella tasaisesti, kun samanaikaisesti vuosina 2013–2016 vuosimarkkinoiden korvaustaso on noussut. Toisaalta vuosimarkkinoiden korvaustaso putosi merkittävästi vuonna 2017. Hinnanvaihtelut ovat seurausta reservikapasiteetin kysynnän ja tarjonnan vaihteluista. Todennäköistä kuitenkin on, että uusiutuvan energian tuotannon tasaisesti kasvaessa myös korvaustaso kysyntäjoustomarkkinoilla paranee yleisesti, jos tarjonta ei pysy kysynnän perässä.

Taulukko 17 Taajuusohjatun käyttöreservin korvaustasot vuosi- ja tuntimarkkinoilla 2013–2017 [130, 131, 132]

Vuosi	Taajuusohjattu käyttöreservi		
	tuntimarkkinat		vuosimarkkinat
	kaupankäyntituntien keskihinta [€/MW]	volyymipainotettu keskihinta [€/MW]	kiinteä kapasiteettikorvaus [€/MW]
2013	50,77	76,07	14,36
2014	45,87	62,52	15,80
2015	28,84	33,75	16,21
2016	26,09	34,67	17,42
2017	21,09	27,46	13,00

Vuosien 2013–2017 teoreettiset maksimikorvaustasot 1 MW:n jatkuvalla säädöllä sekä tunti että vuosimarkkinoilla on esitetty taulukossa 18. Vuotta 2016 lukuun ottamatta tuntimarkkinoiden korvaustaso on ollut vuosimarkkinoita selvästi parempi. Vuosimarkkinoilla korvausta maksetaan tasaisesti kiinteällä hinnalla jokaiselta vuoden tunnilta ja markkinalla voi itse päättää, millä tunneilla markkinalle osallistuu. Mahdollista siis on joustaa vuoden jokaisella tunnilla ja saada siitä etukäteen sovittu kiinteä korvaus. Tuntimarkkinoilla puolestaan korvaustaso vaihtelee tunneittain, koska Fingrid käyttää tuntimarkkinoita täydentävään hankintaan vuosimarkkinoiden joustokapasiteetin hyödyntämisen jälkeen. Reservinhaltijalle maksettava korvaus määräytyy kullekin tunnille erikseen kalleimman tilatun tarjouksen mukaan, jolloin jokaiselle osapuolelle maksetaan tuntimarkkinoilla sama hinta. [132]

Taulukko 18 Taajuusohjatun käyttöreservin teoreettiset maksimikorvaukset jatkuvalla 1 MW säädöllä [130, 132]

Vuosi	Taajuusohjattu käyttöreservi	
	tuntimarkkinat	vuosimarkkinat
	kapasiteettikorvauksen teoreettinen maksimi 1 MW:n jatkuvalla säädöllä [€]	kapasiteettikorvauksen teoreettinen maksimi 1 MW:n jatkuvalla säädöllä [€]
2013	318 227	125 794
2014	279 670	138 408
2015	195 532	142 000
2016	147 530	153 017
2017	182 802	113 880

6.3.2 Säiliön T47 FCR-N- ja yösähköanalyysi vuodelta 2017

Säiliön T47 säästöpotentiaalia vuodelta 2017 on analysoitu eri tavoin. Ensinnäkin säiliön uppokuumenninta olisi voitu hyödyntää taajuusohjatun käyttöreservin tuntimarkkinoilla erilaisia tarjousstrategioita hyödyntämällä tai mahdollisesti vuosimarkkinoilla kiinteällä hinnalla. Lisäksi halvemman yösähkön hyödyntämisestä syntyvää säästöä on analysoitu vuodelle 2017. Laskennan tarkkuutta heikentää se, että historiadataa uppokuumennuksen todellisista tehonkulutuksista vuodelle 2017 ei ollut saatavilla.

Laskuissa vuosi 2017 on jaettu kolmeen osaan. Eri ajanjaksojen keskimääräisten ulkolämpötilojen perusteella on laskettu kappaleessa 6.2 rakennetun mallin pohjalta lämpöhäviöt ja niiden perusteella saatu tarvittu lämmitysteho säiliön lämpötilan ylläpitämiseksi. Yösähköä hyödynnettäessä on oletettu, että pohjaöljyn lämmitys tapahtuu vain klo 21:00–07:00 välisenä aikana eli säiliöön on syötettävä sama energiamäärä 10 tunnissa, joka muuten olisi syötetty 24h aikana. Taulukosta 19 nähdään eri ajanjaksojen keskimääräiset ulkolämpötilat, tarjotut joustotehot taajuusohjattuun käyttöreserviin ja joustotehoa vastaavat yösähkötehot.

Taulukko 19 Lähtötietoja säiliön T47 säästöpotentiaalin analysointiin vuodelle 2017

Ajanjakso	1.1–30.4.2017	1.5–30.9.2017	1.10–31.12.2017
Keskimääräinen ulkolämpötila [°C]	0,7	14,8	4,5
Joustoteho [kW]	103,3	93,7	100,7
Yösähköteho [kW]	247,9	224,9	241,7

Taajuusohjatun käyttöreservin tuntimarkkinoilla toimimisesta maksetaan kapasiteetti- ja energiakorvausta. Kapasiteettikorvaus, joka lasketaan yksinkertaisesti toteutuneen tuntiinnan ja joustotehon tulona, maksetaan reservinhaltijalle ja energiakorvaus tasevastaavalle. Energiakorvaus korvaa tasevastaavalle taajuusohjatun käyttöreservin markkinalle osallistumisesta aiheutunutta kulutustaseen tasevirhettä, jonka määrä lasketaan kaavan (29) avulla.

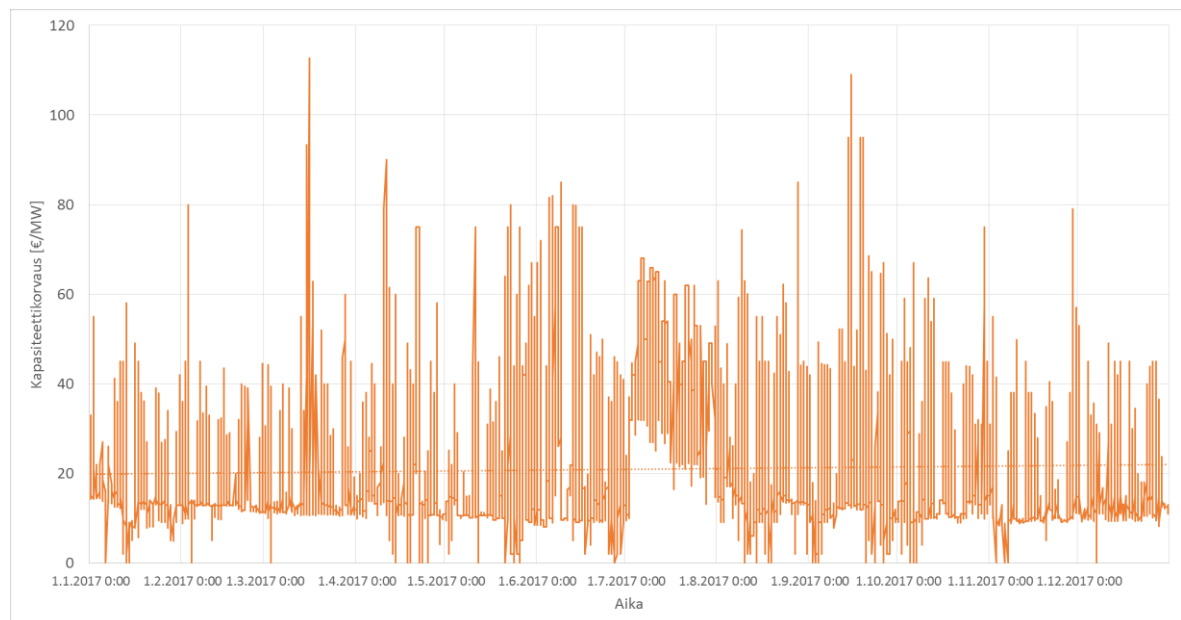
$$E_{\text{reservi}} = \frac{\sum R \cdot 10 \cdot \Delta t \cdot 50 \text{ Hz}}{3600 \text{ s}} \cdot k \quad (29)$$

jossa

E_{reservi}	reservisähkö, [kWh]
$\sum R$	toteutunut yhteenlaskettu taajuusohjatun käyttöreservin määrä, [kW]
Δt	aikapoikkeaman muutos sekunteina tarkastellulla tunnilla, [s]
k	korjauskerroin $k = 0,7$

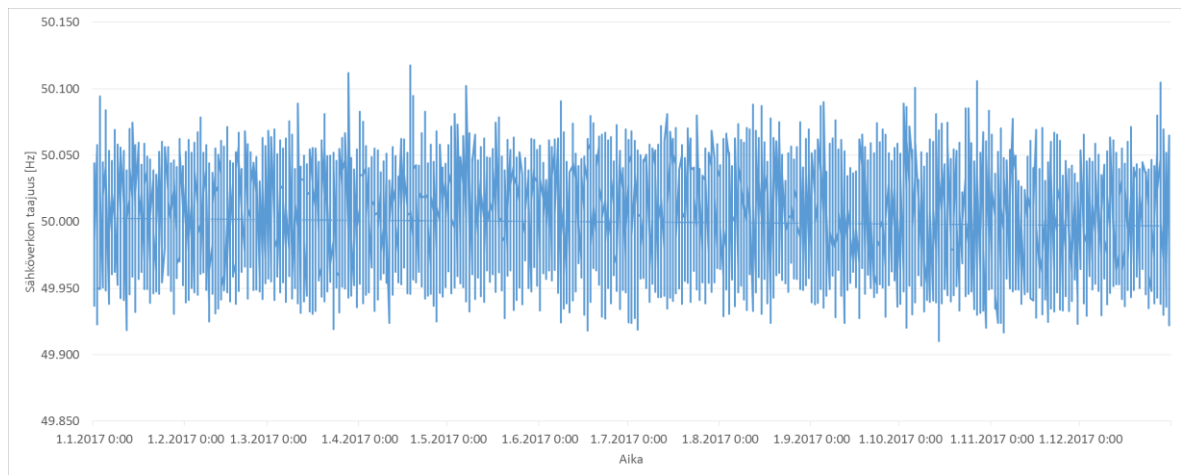
Aikapoikkeama kuvaa sähköverkon taajuudesta riippumattoman kellon ja vaihtosähköverkon taajuuden mukaan käyvän kellon aikaeroa sekunteina [133]. Aikapoikkeaman muutoksen etumerkki kertoo myös, onko taajuuden muutos kyseisellä tunnilla ollut ylös- vai alaspäin 50 hertsistä. Alitaajuustilanteessa eli kun sähköverkon taajuus on alle 50 Hz reservikohteen tehon pienentämisestä aiheutuvan laskennallisen tasevirheen (reservisähkö) Fingrid hyvittää säätösähkömarkkinoiden ylössäätö hinnalla. Ylitaajuustilanteessa puolestaan reservikohteen tehon suurentamisesta aiheutuvan laskennallisen tasevirheen (reservisähkö) Fingrid veloittaa tasevastaavalta säätösähkömarkkinoiden alassäätö hinnalla. [63]

Tuntimarkkinoilla maksettavan korvauksen suuruus määräytyy jokaiselle tunnille erikseen kalleimman tilatun tarjouksen mukaan. Vuoden 2017 toteutuneet hinnat tuntimarkkinoilla näkyvät alla kuvassa 34. Normaalitilanteessa tuntimarkkinoiden korvaustaso ei ylitä sähkönkulutuksesta aiheutuvia kustannuksia, joten säätökapasiteettia ei kannata tarjota markkinalle omaa kulutusta ja tarvetta enempää. Kuitenkin voi olla järkevää tarjota ylimääräinen joustokapasiteetti markkinoille Elspot-hintaa selvästi korkeammalla hinnalla, jotta tarjouksen aktivoituessa maksettu korvaus kattaa myös odotetusta kulutuksen kasvusta aiheutuvat tasesähkökustannukset.



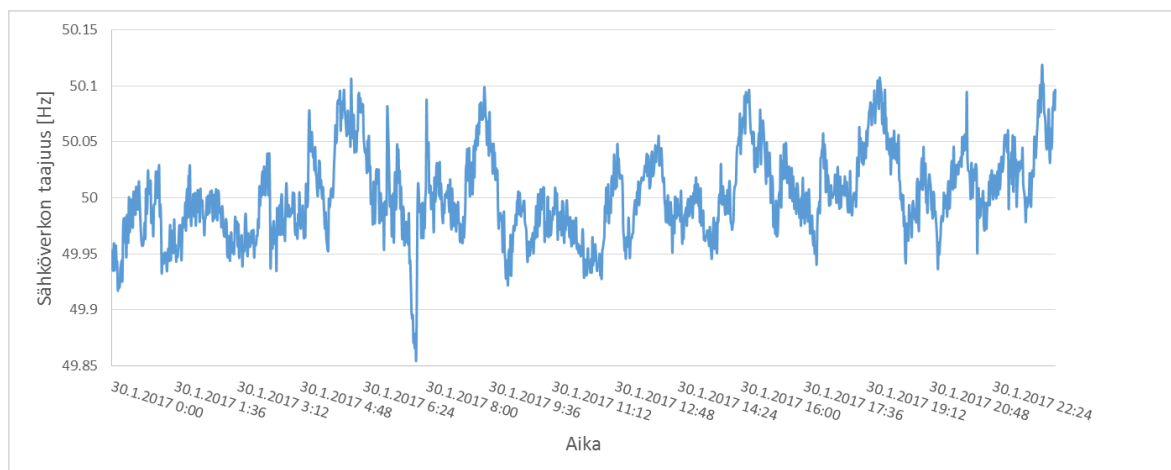
Kuva 34 Taajuusohjatun käyttöreservin tuntimarkkinoiden korvaustaso vuonna 2017 [130]

Analyysissä on tuntimarkkinoiden osalta tutkittu kahta eri tarjousstrategiaa, joissa joustokapasiteettia on tarjottu markkinoille jatkuvilla 6 €/MW ja 17 €/MW tarjouksilla. Vuosimarkkinoilla on mahdollista päättää kiinteällä hinnalla ne tunnit, jolloin tarjoaa joustokapasiteettiaan markkinoille. Analyysissä on vuosimarkkinoiden osalta oletettu säätöä tehtävän jokaisella vuoden tunnilla. Yösähkön osalta on yksinkertaisesti vertailtu normaaliajon tasaisen kulutuksen kustannuksia yösähkön hyödyntämisellä syntyviin kustannuksiin. Kuvassa 35 on esitetty vuoden 2017 Porvoon jalostamon tuntikeskiarvotettu sähköverkon taajuus, johon uppokuumentimen ohjaus perustuisi taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla. Taajuus vaihtelee tuntien sisällä hetkellisesti paljonkin, mutta keskiarvottaminen tasoittaa suurimmat vaihtelut.



Kuva 35 Sähköverkon taajuus tuntikeskiarvoina Porvoon jalostamolla vuonna 2017 ajan funktiona

Taajuutta tarkasteltaessa minuuttikeskiarvoina huomataan kuvan 36 mukaisesti, että vuorokauden sisällä taajuus vaihtelee normaalisti hyvinkin paljon 50 Hz:n molemmiin puolin. Kuitenkin esimerkiksi 30.1.2017 (kuva 36) Fingridin mitaaman taajuuden vuorokauden keskiarvotaajuus on ollut 50,002 Hz tarkoittaen sitä, että taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla 24 tunnin jatkuvalla säädöllä reservikohteen toteutunut keskimääräinen pätöteho kyseisenä päivänä olisi ollut sama kuin markkinalle tarjottu joustokapasiteetti [134].



Kuva 36 Sähköverkon taajuus 30.1.2017 minuuttikeskiarvoina ajan funktiona mitattuna Fingridin 400 kV sähköasemilta eri puolilta Suomea [134]

Yhteenveto eri säästöstrategioilla saatavista kustannussäästöistä on koottu taulukkoon 20. Taajuusohjatun käyttöreservin tuntimarkkinoilla tarjoushinnalla on mahdollista määrittää se korvaustaso, jolla reservinhaltijan kannattaa joustokohdettaan säätää. Mitä pienemmällä hinnalla on valmis osallistumaan markkinalle, sitä enemmän säästöä vuoden aikana syntyy. Esimerkiksi matalalla 6 €/MW tarjouksella jokaiselle vuoden tunnille säiliön T47 uppokuumentinta olisi pitänyt säätää lähes taukoamatta vuonna 2017 ja siitä olisi syntynyt 49 % säästöt uppokuumentimen kokonaiskustannuksista. Toisaalta korkeammalla 17 €/MW tarjouksella tarjous olisi aktivoitunut vain 42 % vuoden tunneista, mutta säästöt olisivat olleet 33 % kokonaiskustannuksissa. Kun joustokohdetta ei säädetä, antaa se mahdollisuuden säätää pohjaöljyn lämpötila takaisin haluttuun asetusarvoon. Taajuusohjatun käyttöreservin vuosi-markkinoilla korvaustaso on matalampi, mutta myös suoraan verrannollinen tehdyn säädön

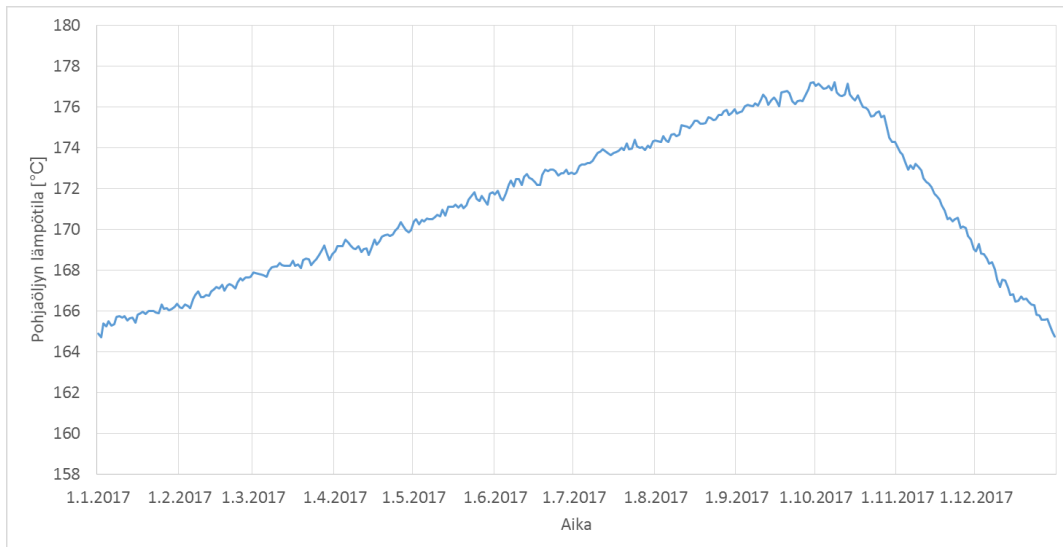
määrään ja siten aina ennakoitavissa. Kuitenkin vuonna 2017 tuntimarkkinoilla olisi syntynyt suuremmat säästöt säätämällä joustokohdetta vain 42 % vuoden tunneista verrattuna vuosimarkkinoiden jatkuvaan säätöön.

Yösähköä hyödyntämällä säästö uppokuumentimen kokonaiskustannuksissa olisi vuonna 2017 ollut noin 14 %. Yösiähkön hyvä puoli on se, että vaaditut järjestelmämuutokset sen hyödyntämiseksi ovat pienehköjä. Kuitenkin säiliöiden operoinnin kannalta se asettaa haasteita, koska lämmitys olisi 14 tuntia päivässä kokonaan pois päältä, jolloin pohjaöljyn lämpötila vaihtelisi päivittäin todennäköisesti enemmän kuin taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla toimiessa. Lisäksi, kun päivän aikana mahdollisesti ajetaan pohjaöljyä prosessin ja eri säiliöiden välillä ja säiliön tuote vaihtuu, voidaan uppokuumenninta tarvita nostamaan uuden pohjaöljyn lämpötilaa lähemmäksi asetusarvoa.

Taulukko 20 Yhteenveto vuoden 2017 säiliön T47 säästöpotentiaaleista eri säästöstrategioilla

Säästöstrategia	Taajuusohjattu käyttöreservi			Yösähkö
	tuntimarkkinat		vuosimarkkinat	
	jatkuva 6 €/MW tarjous	jatkuva 17 €/MW tarjous	jatkuva säätö	
Sähkökustannukset normaaliajalla [€]	36 236	36 236	36 236	36 236
Kapasiteettikorvaus [€/a]	17 822	11 952	11 231	-
Energiakorvaus tasevastaavalle [€/a]	408	235	408	-
Säästö reservinhaltijalle [€/a]	17 822	11 952	11 231	5 229
Säästö reservinhaltijalle [%]	49	33	31	14
Joustokohdetta säädetty vuoden tunneista [%]	97	42	100	-

Kappaleessa 6.2 rakennetun mallin avulla on tutkittu laskennallisesti taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla tapahtuvan jatkuvan jouston vaikutusta säiliön T47 pohjaöljyn lämpötilaan. Laskennan oletuksia olivat vakiohäviöt 1,9 metrin pohjaöljyn pinnankorkeudella ja 0 °C ulkolämpötilalla koko vuoden ajalle, ja jatkuva tarjottu 104 kW säätökapasiteetti. Säiliön lämpötilan muutokset ajan funktiona on esitetty kuvassa 37. Laskenta on täysin hypoteettinen, mutta kuvastaa hyvin sitä, että vuoden 2017 sähköverkon taajuuden vaihteluilla ylös- ja alassäätöä on tapahtunut suunnilleen yhtä paljon ja jopa säiliön minimipinnalla olisi mahdollisesti pysytty vaaditulla 150–180 °C lämpötila-alueella.



Kuva 37 Säiliön T47 pohjaöljyn hypoteettiset lämpötilavaihtelut jatkuvalla säädöllä taajuusohjatussa käyttöreservissä vakioämpöhäviöillä ja vakiosäädöllä

6.4 Investointilaskelma säiliön T47 liittämisestä taajuusohjattuun käyttöreserviin (FCR-N)

Investointilaskelma säiliön T47 liittämisestä taajuusohjatun käyttöreservin markkinalle auttaa lopullisen investointipäätöksen tekemisessä. Jotta laskelma voidaan tehdä, vaaditaan tietoa muun muassa tarvittavien järjestelmämuutosten ja investointien kustannuksista ja oletetuista tuotoista. Myös järjestelmän ylläpitäminen ja tarjousten jättäminen markkinalle vaatii jonkin verran työpanosta ja aiheuttaa siten kustannuksia.

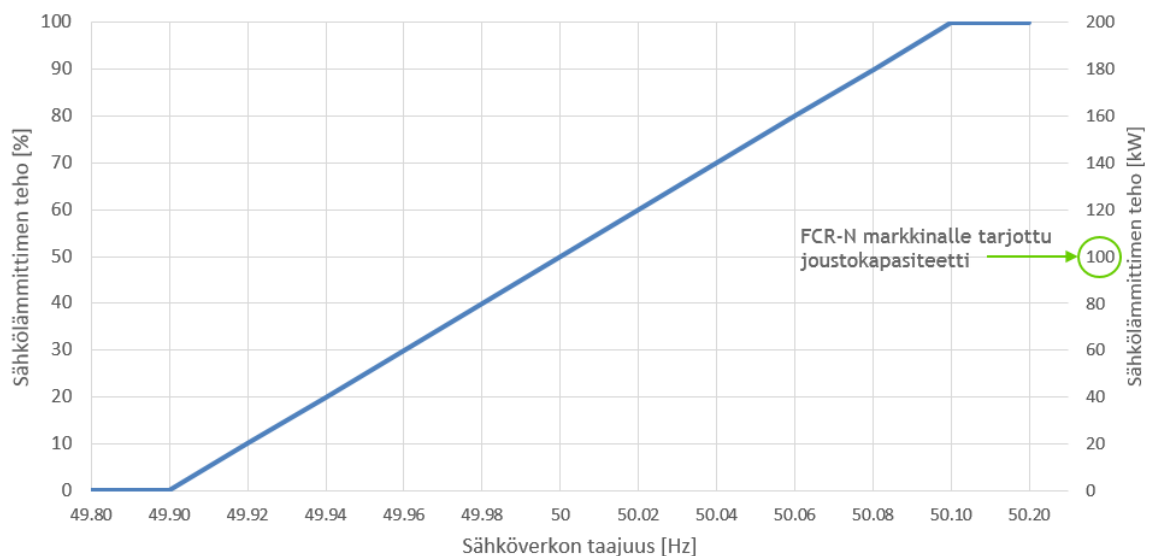
6.4.1 Vaaditut järjestelmämuutokset ja investoinnit

Tällä hetkellä säiliön T47 tuotteen lämpötilaa säädetään ohjaamon automaatiojärjestelmän avulla antamalla säätimelle haluttu asetusarvo, joka ohjaa uppokuumentimen tehoa [98]. Esimerkiksi, jos asetusarvoksi on asetettu 165 °C ja säiliön tuote vaihtuu 155 °C:ksi, automaatio nostaa uppokuumentimen tehoa siten, että haluttu asetusarvo saavutetaan. Kun asetusarvoksi asetettu lämpötila on saavutettu, laskee automaatio uppokuumentimen tehoa vastaamaan senhetkisiä lämpöhäviöitä ylläpitäen saavutettua lämpötilaa.

Taajuusohjatun käyttöreservin markkinalle osallistuminen vaatii muutoksia automaatiojärjestelmään ja investoinnin sähköverkon taajuuden mittalaitteeseen, joka sijoitettaisiin sopivaan paikkaan jalostamoalueella. Säiliön lämpötilasäädön muuttaminen ei ole aivan yksinkertaista. Taajuusmittalaitteen hankinta ja säiliön lämpötilasäädön muuttaminen automaatiojärjestelmään riskit huomioiden vaatii resursseja, joita löytyy esimerkiksi Nesteen suunnittelutoimistolta eli Neste Engineering Solutions Oy:ltä. Hanke etenisi suurin piirtein seuraavasti [63, 135, 136]:

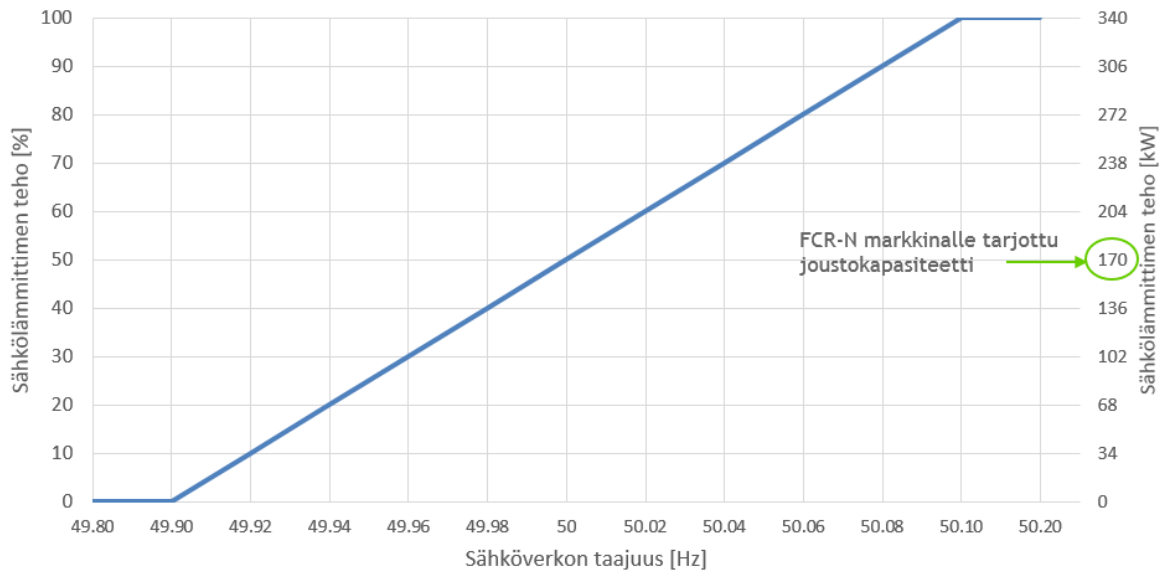
1. Tehdään pienet tekniset muutokset tarkastelu, jonka avulla selvitetään säiliön lämpötilasäätöön tehtävien muutosten ja taajuusmittalaitteen asennuksen vaikutukset turvallisuuteen, operointiin, käytettävyyteen ja kunnossapitoon
2. Taajuusmittalaitteen, jonka tarkkuus on vähintään 0,01 Hz, suunnittelu ja asennus
3. Säädön toimintakuvauksen tekeminen
4. Säätkäavion tekeminen
5. Säädön testaus automaatiojärjestelmässä
6. Pilotointi/kokeilu käytännössä
7. Säätkokeiden tekeminen Fingridin edustajan mahdollisesti läsnä ollessa

Kysyntäjoustomarkkinalla toimimiseksi vaadittu taajuusohjattu säätö tulee rakentaa melko nopeaksi, jotta tarjottu säätökapasiteetti aktivoituu alle kolmessa minuutissa 0,10 Hz:n taajuusmuutoksesta sähköverkon 50 Hz:n nimellistaajuudesta. Lisäksi säätöön olisi hyvä saada erilaisia säätöstatiikoita, jotta säätämällä pystyttäisiin paremmin hallitsemaan säiliöiden lämpötiloja. Kuvassa 38 kuvataan taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla toimivan sähkölämmittimen tehomuutoksia silloin, kun tuntimarkkinoille tarjottu kapasiteetti on 100 kW ja kauppa on toteutunut. Tässä tapauksessa taajuudella 49,90 Hz lämmittimen teho olisi 0 kW ja vastaavasti 50,10 Hz:n taajuudella 200 kW. Useamman tunnin ajalta otettu sähköverkon taajuuden keskiarvo (kuva 36) on normaalitilanteessa noin 50 Hz, mikä tarkoittaa sitä, että normaalitilanteessa pidemmän ajanjakson keskiteho vastaa tarjottua joustokapasiteettia. Säiliön T47 pohjaöljyn lämpötila saadaan keskimäärin ylläpidettyä 100 kW:n uppokuumentimen teholla, joten todennäköisesti kuvan 38 mukaisella 100 kW:n joustokapasiteetilla ja useamman tunnin säädöllä pohjaöljyn lämpötila on säädön lopussa lähes sama kuin säädön alussa.



Kuva 38 Sähkölämmittimen tehon muuttuminen sähköverkon taajuuden funktiona ja 100 kW:n joustokapasiteetilla

Tilanteissa, joissa esimerkiksi säiliöön T47 ajetaan reilusti asetusarvoa kylmempi tuote esimerkiksi 155 asteisena, olisi taloudellisessa mielessä järkevää säätää uppokuumentinta kuvan 39 mukaisesti. Jos ei ole kiirettä säätää pohjaöljyn lämpötilaa asetusarvoon täydellä teholla, 170 kW:n keskimääräisellä teholla asetusarvo saavutetaan normaalilla taajuuden vaihtelulla, mutta hitaammin. Samaan aikaan suuremmalla joustokapasiteetilla saavutetaan suuremmat säästöt taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla.



Kuva 39 Sähkölämmittimen tehon muuttuminen sähköverkon taajuuden funktiona ja 170 kW:n joustokapasiteetilla

Hankkeessa on myös huomioitava, että taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla tiedonvaihto Fingridin kanssa tapahtuu sähköisesti. Tähän kuuluvat muun muassa kolmen minuutin välein (tulevaisuudessa yhden minuutin välein) Fingridille lähetettävä reaaliaikainen ylläpidetystä taajuusohjatun käyttöreservin määrästä, jolla Fingrid seuraa reservien ylläpitoa ja aktivoitumista. Reaaliaikainen tieto lähetetään EDI-sanomalla (Electronic Data Interchange), jossa kerrotaan sen hetkinen todellinen ylläpidetty reservin määrä [137]. Reaaliaikainen tieto lasketaan yhtälön (30) avulla. [63, 105]

$$C_{FCR-N} = \max[\min((P_{max} - P, P - P_{min}, C_{säätökoemäärä}), 0] \quad (30)$$

jossa

C_{FCR-N}	ylläpidetty taajuusohjatun käyttöreservin määrä kyseisellä ajanhetkellä, [MW]
P_{max}	joustokohteen maksimiteho, [MW]
P	joustokohteen tehonkulutus kyseisellä ajanhetkellä, [MW]
P_{min}	joustokohteen minimiteho, [MW]
$C_{säätökoemäärä}$	säätökokein todennettu reservimäärä, [MW]

Lisäksi Fingridille tulee toimittaa EDI-sanomalla viimeistään 10 päivän kuluessa toimituspäivästä reservikohteiden toteutuneet tuntikeski- ja maksimitehot ja taajuusohjatun käyttöreservin määrä tuntimarkkinoilla ja vuosisopimuksella. Historiatietoja, jotka tulee toimittaa Fingridin pyynnöstä, säätöön osallistuvien reservikohteiden yksikkökohtaisista päätötehotiedoista tulee säilyttää vähintään neljän vuorokauden ajalta. Tietoja tulisi kerätä yhden sekunnin tarkkuudella, jotta esimerkiksi häiriötilanteissa sopimuksen mukainen aktivoituminen voidaan todentaa. [105] Kuitenkin 5-10 sekunnin historiatietojen tarkkuus on vielä hyväksyttävää. [138]

Fingrid todentaa reservikapasiteetin säätötekniset ominaisuudet säätökokeilla ennen sopimuksen voimaantuloa. Säätökokeet tehdään reservikohteen normaalissa käyttötilanteessa normaaliajon mukaisilla asetteluilla. Reservikohteella voi olla useita säätöasetteluita, joiden kaikkien toiminta todennetaan säätökokeilla. Reservinhaltija myös vastaa siitä, että reservikohteelle tehdään säätökokeet aina, kun järjestelmään tehdään reservikäyttöön vaikuttavia

muutoksia, joita ovat esimerkiksi säätölaitteiden uusiminen ja säätöparametrien muutokset. Reservinhaltija vastaa säätökokeiden mittauspöytäkirjojen tekemisestä ja lisäksi kuvaa säätöjärjestelmänsä toimintaperiaatteen Fingridille. Säätökokeissa suoritettavien mittausten kokonaisvirhe saa olla enintään 10 %. [105]

Suunnittelutoimiston kautta toteutettuna hanke maksaa noin 30 000 € [139].

6.4.2 Investoinnin kannattavuus ja diskontattu takaisinmaksuaika

Investoinnin eli tässä tapauksessa kappaleessa 6.4.1 esitetyn hankkeen kannattavuutta arvioidaan laskemalla hankkeelle diskontattu takaisinmaksuaika. Diskonttaus tarkoittaa tulevaisuuden rahavirran arvottamista nykypäivän rahaksi. Laskennan lähtötiedoiksi tarvitaan arviot alkuinvestoinnin suuruudesta, vuosittaisista tuotoista ja kuluista ja investoinnilta vaaditusta tuottokorosta. Alkuinvestointi on kappaleen 6.4.1 mukaisesti 30 000 €, mutta lisäksi vuosittaisia työntekijäkuluja kysyntäjoustop käytännön asioiden hoitamisesta oletetaan aiheutuvan 20 000 €.

Vuosittaiset taajuusohjatun käyttöreservin markkinalta saadut tuotot ovat suoraan verrannollisia säädetyn joustokapasiteetin määrään. Realistiseksi vuosittaiseksi tuotto-odotukseksi tuntimarkkinoilla oletetaan kappaleen 6.3.2 pohjalta 150 000 €/MW. Jotta investointi olisi kannattava, tulee joustokapasiteettia olla riittävästi. Säiliön T47 uppokuumentimesta saadaan joustokapasiteettia noin 100 kW, joka ei yksinään riitä tekemään investointia kannattavaksi, koska 15 000 €:n säästö ei riitä kattamaan edes vuosittaisia kiinteitä työntekijäkustannuksia. Säiliöiden T45-T49 sähkölämmittimien (kappale 5.1 taulukko 10) avulla on kerättyyn historiadataan ja varovaiseen arvioon pohjautuen saatavissa taajuusohjatun käyttöreservin markkinalle yhteensä ainakin noin 500 kW joustokapasiteettia, joka tarkoittaisi vuosittaisia 75 000 € säästöjä.

Laskuissa käytetty diskonttauskorko eli investoinnilta vaadittu tuottokorko i on oletettu 10 prosentiksi. Vuosittaiset diskonttaustekijät lasketaan kaavan (31) avulla:

$$\text{Diskonttaustekijä vuodelle } n = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (31)$$

jossa

i	investoinnilta vaadittu tuottokorko, [%]
n	tarkasteluvuosi, [a]

Hankkeen diskontattu takaisinmaksuaika lasketaan taulukon 21 avulla laskien joka vuodelle kumulatiivinen diskontattu takaisinmaksuaika ja etsimällä ajankohta, jolloin se muuttuu positiiviseksi.

Taulukko 21 Kannattavuuslaskelma säiliöiden T45-T49 sähkölämmittimien liittämistä taajuusohjattuun käyttöreserviin

Vuosi n	Säästöt [€]	Kulut [€]	Kassa- virta [€]	Diskont- taustekijä	Diskon- tattu kassa- virta [€]	Kumulatiivinen diskontattu kassavirta [€]
0	0	30 000	-30 000	1	-30 000	-30 000
1	75 000	20 000	55 000	0,909	50 000	20 000
2	75 000	20 000	55 000	0,826	45 455	65 455
3	75 000	20 000	55 000	0,751	41 322	106 777

Taulukon 21 perusteella hankkeen diskontattu takaisinmaksuaika on:

$$\frac{|-30\,000|}{20\,000} = 0,6 \text{ a} = 7,2 \text{ kk}$$

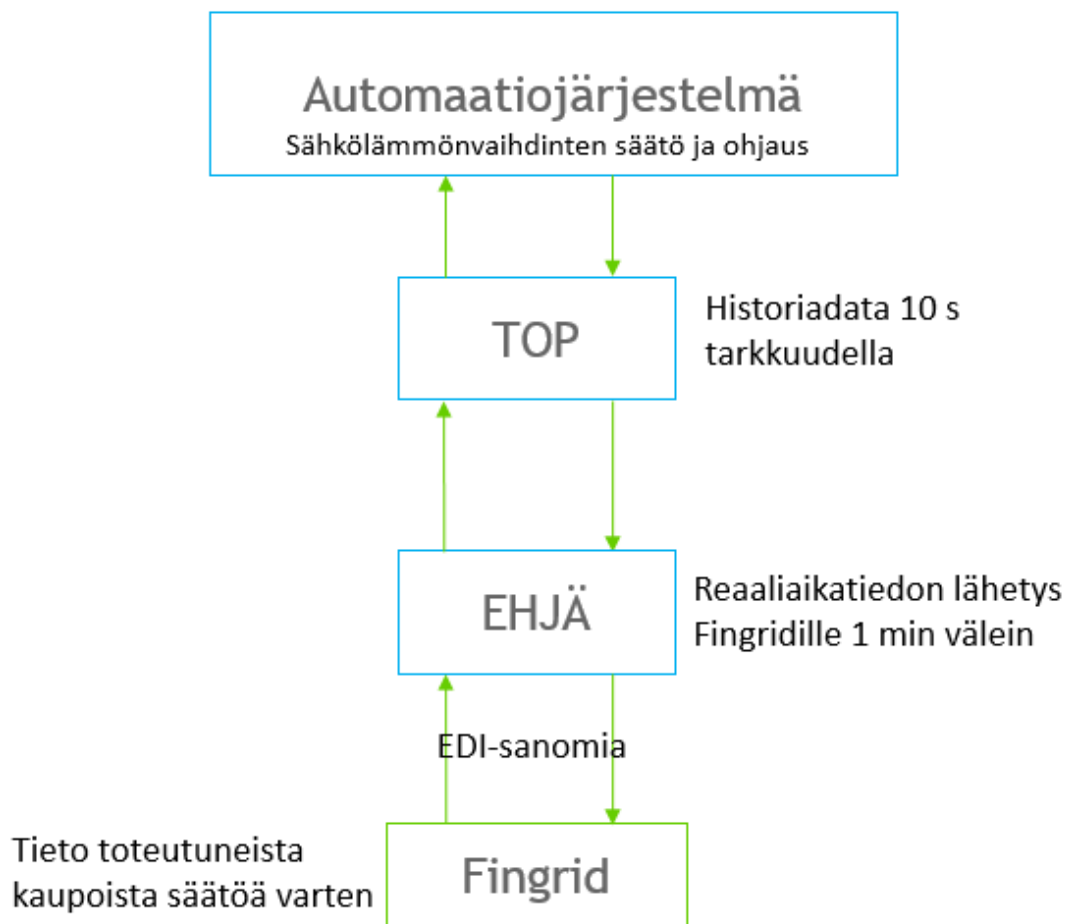
Investointi maksaa itsensä takaisin 7,2 kuukauden aikana, joka on takaisinmaksuajaksi todella lyhyt. Täten investointi kannattaa toteuttaa.

6.4.3 Mahdollinen käytännön toimintamalli kysyntäjouston hyödyntämisessä ja siihen liittyvät haasteet

Siinä vaiheessa, kun kappaleessa 6.4.1 esitetty hanke on saatu toteutettua, on mahdollisuus osallistua taajuusohjatun käyttöreservin markkinalle. Vaihtoehtoina on osallistua joko tuntimarkkinoille tai yrittää päästä tarjouskilpailun kautta osallistumaan vuosimarkkinoille. Tavallisen reservikohteen tulee kyetä vähintään 60 minuutin yhtäjaksoiseen aktivointiin. Fingridin kanssa on kuitenkin hyvä keskustella, hyväksytäänkö pohjaöljysäiliöt rajoitetun aktivointikyvyn reservikohteiksi, joiden tarvitsee kyetä vähintään 30 minuutin yhtäjaksoiseen täysimääräiseen aktivointiin ja mahdollisuuksien mukaan pysyä aktivoituneena koko toimitusjakson ajan [63].

Tuntimarkkinoilla toimiessa täytyy kappaleen 4.3.1 mukaisesti jättää joustotarjoukset seuraavan vuorokauden tunneille klo 18:30 mennessä ja toteutuneet kaupat Fingrid vahvistaa klo 22:00 mennessä. Tämä tarkoittaa sitä, että nimetyn Nesteen työntekijän täytyy huolehtia toteutettavissa olevien joustotarjousten jättämisestä markkinalle ottaen huomioon sen hetkiset säiliöiden täyttöasteet, lämpötilat ja tiedossa olevat pohjaöljyajat eri säiliöiden ja prosessin välillä. Näiden tietojen avulla pitäisi pystyä tarpeeksi hyvin päättämään reservikohteen säätövara ja sen mukaan määrittämään hinta, jolla kapasiteettia markkinalle tarjotaan, sillä tarjoushinnan kasvaessa myös tarjouksen aktivoitumisen todennäköisyys markkinalla pienenee. Markkinalle voi myös jättää erihintaisia tarjouksia. Reservinhaltija voi myös jättää tarjoamatta markkinalle ne tunnit, joilla ei ole riittävästi säätövaraa. Kyseisillä tunneilla on silloin mahdollista säätää pohjaöljyn lämpötilaa haluttuun suuntaan asetusarvon mukaisesti. Tuntimarkkinoille jätetyt tarjoukset Fingrid käsittelee aina erillisinä tarjouksina ja aggregoiduissa tarjouksissa, joita tässä tapauksessa voidaan myös tarvita, tulee kertoa aggregointiyhdistelmänumero, jonka avulla Fingrid yhdistää osatarjoukset toisiinsa [67]. Lisäksi työntekijän, joka vastaa kysyntäjoustomarkkinoilla toimimisesta, tulee huolehtia siitä, että säätökokeet suoritetaan uudelleen, jos reservikohteen säätöominaisuuksia muutetaan.

Vuosimarkkinoilla toimiessa erona on se, että Fingridille tulee toimittaa reservisuunnitelmat seuraavan vuorokauden tuntien reservimääristä klo 18:00 mennessä. Käytännössä vuosimarkkinoilla Fingridille ilmoitetaan ne tunnit, jolloin reserviään säätää ja siitä maksetaan vuosisopimuksen mukainen korvaus. Tällöin reservituotot ja säätötunnit ovat etukäteen reservinhaltijan tiedossa toisin kuin tuntimarkkinoilla. Siten vuosimarkkinoilla lämpötilasäädön riskit ovat paremmin hallinnassa, mutta myös kysyntäjoustopuutto-odotuskin on pienempi verrattuna tuntimarkkinoihin. Mikäli mittauksin todennettu reservikapasiteetti alittaa toteutuneen kaupan tai reservisuunnitelman mukaisen kapasiteetin, joutuu reservinhaltija maksamaan Fingridille toimittamatta jääneestä kapasiteetista korvausta 100 % kyseisen tunnin hinnasta [66, 68]. Myös taloudellisessa mielessä on siksi tärkeä pystyä ennustamaan 1-3 vuorokauden päähän ne tunnit, jolloin kykenee osallistumaan taajuusohjatun käyttöreservin markkinalle tarjouksen tai reservisuunnitelman mukaisesti. Tiedonvaihto Fingridin kanssa vuosi- ja tuntimarkkinoilla tapahtuu sähköisesti EDI-sanomien välityksellä. Toimintamallin mukainen tiedonsiirto eri järjestelmien välillä on esitetty kuvassa 40.



Kuva 40 Mahdollinen tiedonsiirto eri järjestelmien välillä taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla toimiessa

Käytännön toimintamalli taajuusohjatun käyttöreservin tuntimarkkinoilla toimiessa voisi mahdollisesti olla:

1. Nesteen työntekijä, joka vastaa taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla toimimisesta, määrittää työpäivänsä aikana SPOT-tilauksen tekemisen jälkeen todennäköisesti iltapäivällä joustokapasiteettitarjoukset seuraavalle vuorokaudelle tai perjantaina seuraavalle kolmelle vuorokaudelle. Tarjoukset lähetetään sähköisesti EHJÄ-järjestelmän kautta Fingridille.
2. Samana päivänä klo 22:00 mennessä Fingridiltä tulee sähköisesti EHJÄ-järjestelmään tieto toteutuneista kaupoista, niiden hinnoista ja määristä. Fingrid saattaa käyttää esimerkiksi vain osan tarjouksen kapasiteetista.
3. EHJÄ-järjestelmästä siirrettäisiin tieto toteutuneista kaupoista automaattisesti TOP-järjestelmään, jossa myös säilytettäisiin vaadittu historiadata säätöön osallistuvien reservien tehotiedoista.
4. Suunnittelutoimiston toteuttamassa hankkeessa rakennettu tietokonesäätö ohjaisi sähkölämmittimiä automaattisesti toteutuneiden kauppojen pohjalta markkinan vaatimusten mukaisesti. Niinä tunteina, kun kauppa ei toteudu, säiliöiden lämpötilasäätö toimisi lämpötila-asetusarvon mukaan.

Edellä kuvattu toimintamalli on teknisesti mahdollinen toteuttaa, mutta käytännön toteutus ei ole yhtä suoraviivainen. Säädön automatisoinnissa tulee esimerkiksi ottaa huomioon tietoturvariskit ja mahdolliset häiriötilanteet, joita voi syntyä esimerkiksi viallisen datan siirron seurauksena. Lisähaasteena on myös se, onko kauppaa hallinnoivalla työntekijällä aina ajantasainen tieto kunkin päivän pohjaöljyajoista ja sitä kautta säiliöiden pinnoista ja säätövarasta. Varsinkin viikonlopun yli säätövaran oikein ennustaminen on haasteellista, joten sähkölämmittimien taajuusohjattuun säätöön on syytä lisätä reunaehto, joka sallii taajuusohjatun säädön esimerkiksi vain silloin, kun pohjaöljyn lämpötila säiliössä on 152–178 °C välillä. Jos ehto ei toteudu, vaihtuu taajuusohjattu säätö automaattisesti tavalliseksi asetusarvopohjaiseksi säädöksi.

7 Muita kysyntäjoustomahdollisuuksia Porvoon jalostamolla

Porvoon jalostamolla on lukuisia sähkölaitteita (kappale 2.4.2 taulukko 2), jotka kuluttavat sähköä, mutta niiden säätö- ja kysyntäjoustomarkkinapotentiaalin selvittäminen on hyvin työläs prosessi. Tämän työn puitteissa tästä työstä tehtiin vain pieni osa, koska työssä keskityttiin pohjaöljyketjusta löydettyihin säiliöalueen sähkölämmittimiin ja niiden hyödyntämiseen kysyntäjoustossa. Tässä kappaleessa on käyty lyhyesti läpi muita Porvoon jalostamolta löydettyjä potentiaalisia kysyntäjoustokohteita sekä myös käsitelty ylemmällä tasolla tiettyjen laiteryhmiä kysyntäjoustopotentiaalia.

7.1 Sähkösaatot, pumput, kompressorit ja säiliösekoittajat

Porvoon jalostamolla on melkein 50 000 sähkösaattoja ja niiden hallinta jo lukumäärän pohjalta on energiatehokkuus- ja kysyntäjoustomielessä haastavaa. Uudet sähkösaatot ovat paremmin hallittavissa ja esimerkiksi niiden asetusarvoja voi pystyä säätämään etänä. Lisäksi osa saatoista säätää tehoaan ulkolämpötilaohjatusti eikä kyseisissä saatoissa juurikaan ole kysyntäjoustopotentiaalia. Vanhat sähkösaatot, joista on olemassa kaikkein vähiten tietoa, ovat energiatehokkuusmielessä potentiaalisia kohteita, koska niiden lämpötila-asetusarvot voivat olla syystä tai toisesta liian suuria ja ne kuluttavat siten turhaan sähköä. Kysyntäjouston kannalta haasteellisinta on sähkösaattojen säädön hallinta ja säädöllä saavutettava muutos sähkönkulutuksessa. Kunkin sähkösaaton kuluttaman sähkötehon selvittäminen vaatii syvää perehtymistä aiheeseen. Ilman tehotietoja on haastava analysoida säätökapasiteettia ja kysyntäjoustosta mahdollisesti saatavia säästöjä.

Pumppuja ja kompressoreita on Porvoon jalostamolla yhteensä yli 2 300 kappaletta, joista suurin osa liittyy kuitenkin ydinprosessiin tavalla tai toisella. Laitteiden teholuokat vaihtelevat todella paljon, mutta kysyntäjoustoon kapasiteetin perusteella potentiaalisia eli keskisuuria ja suuria pumppuja ja kompressoreita löytyy jalostamoalueelta useita satoja (kappale 2.4.2 taulukko 3). Jalostamolla ydinprosessin toimintavarmuuden turvaaminen menee lähtökohtaisesti aina kysyntäjouston edelle jo taloudellisistakin syistä, mikä aiheuttaa haasteita saada koottua useiden kysyntäjoustomarkkinoiden vaatimaa isohkoa 5-10 MW:n minimitarjoukseen mukaista kapasiteettia. Lisäksi korvaustaso kysyntäjoustomarkkinoilla on yleisesti vielä melko vaatimaton, mikä johtaa siihen, ettei turhia riskejä kysyntäjouston edistämiseksi prosessin kustannuksella kannata ottaa. Jokaista potentiaalista joustokohdetta on erikseen tutkittava osana kokonaisuutta, mikä vaatii aina asiantuntemusta ja hyvää yhteistyötä laitetta operoivien kanssa, koska joustokohde ei saa suoraan vaikuttaa ydinprosessin toimintaan sen tehoa säädettäessä. Riittävän puskurin, hyvien säätöominaisuuksien ja ison nimellistehon omaavien pumppujen ja kompressoreiden löytäminen on haastavaa, eikä niitä tämän työn puitteissa löydetty Mustijoen pumppuja (kappale 7.2) lukuun ottamatta.

Säiliösekoittajien, joita käytetään esimerkiksi pohjaöljysäiliöissä pitämään tuote tasalaatuisena, hyödyntäminen kysyntäjoustossa ei vaikuta mahdolliselta, koska sekoittajat ovat normaaliarvoissa aina päällä ja niiden nimellistehot ovat pienehköjä. Lisäksi työssä tutkittujen pohjaöljysäiliöiden sekoittajilla on kysyntäjouston kannalta heikot säätöominaisuudet eikä myöskään riittävästi säätökapasiteettia.

7.2 Mustijoen pumpput

Porvoon jalostamolle pumpataan vettä Mustijoelta ja välivarastona Mustijoen ja jalostamon välillä on tekojärvi. Mustijoella on neljä pumppua, joiden nimellistehot ovat 132 kW. Normaalitylanteessa kahta pumpuista ajetaan melkein täydellä teholla. Lisäksi kolme pumpuista on invertterisäädetyjä eli niiden tehoa on mahdollista säätää tarvittaessa. Nykyisellä vedenkulutuksella ei pumpuissa ole kuitenkaan kovin paljon säätövaraa, sillä tekojärvi on pienehkö verrattuna vedenkulutukseen. Lisäksi Mustijoen pumpput ovat sekä Porvoon kaupungin että Nestein hallinnoimia, joten pumppujen hyödyntäminen sähkön kysyntäjoustossa ei tällä hetkellä ole yksinään Nestein käsissä. [140] Todennäköisesti pumppujen keskimääräinen tehonkulutus on vain noin 200 kW, jolla ei sähkön kysyntäjoustomarkkinoilla ole yksinään saavutettavissa kovinkaan suuria säästöjä. Potentiaalisia kysyntäjoustomarkkinoita Mustijoen pumpuille ovat mahdollisesti taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi, mutta pumppujen hyödyntäminen ja taloudellinen kannattavuus kysyntäjoustossa vaatii lisäselvityksiä.

7.3 Jakelutermiinaalin säiliöiden B1-B4 sähkölämmittimet

Uusiin pohjaöljyketjun ajomalleihin liittyvät myös jakelutermiinaaliin keväällä 2018 valmistuvat pohjaöljysäiliöt B1-B4, joita lämmitetään kuumaöljykyierrolla. Kuumaöljy lämmitetään sähkölämmittimillä EA-5609A/B, joista toinen on aina kerrallaan päällä. Kummatkin lämmittimet ovat nimellistehoiltaan 1 400 kW, joten joustokapasiteettia esimerkiksi taajuusohjatun käyttöreservin markkinalle löytyy todennäköisesti ajomallien uudistamisen jälkeenkin noin 300–500 kW.

Kuumaöljylämmittimien liittäminen taajuusohjattuun käyttöreserviin olisi luonnollista joko samanaikaisesti muiden pohjaöljyketjun tutkittujen sähkölämmittimien kanssa tai sitten myöhemmin tulevaisuudessa, koska kaikkien lämmittimien ohjauksessa voitaisiin käyttää samaa taajuusmittaustietoa. Lisäksi säiliöiden B1-B4 lämpötilakäyttäytyminen on todennäköisesti hyvin samankaltainen säiliön T47 kanssa. Kuitenkin on todennäköistä, että uusien säiliöiden B1-B4 lämpöhäviöt ovat muun muassa uusien eristeiden takia pienemmät verrattuna säiliöön T47. Tekninen haaste kuumaöljylämmittimien suhteen on kuitenkin se, että niiden tyristorisäätimissä on ollut aikaisemmin pieniä ongelmia, mikä voi haitata taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla toimimista.

7.4 Höyryturbiinipumput

Porvoon jalostamolla on yli kymmenen turbiinikäyttöistä pumppua, joiden yhteenlaskettu akseliteho on useita megawatteja. Lisäksi usealla höyryturbiinipumpulla on sähkökäyttöinen varapumppu. Vuonna 2014 on selvitetty turbiinikäyttöisten pumppujen käytön optimointia yösähkön edullisempaa hintaa hyödyntämällä ja samalla höyrynkulutusta pienentämällä. Sähkön kysyntäjoustossa nykyisellä toimintamallilla sähkökäyttöisten varapumppujen hyödyntäminen voisi olla mahdollista alassäätävänä kapasiteettina ylitaajuustilanteissa esimerkiksi säätösähkö- tai säätökapasiteettimarkkinoilla. Näin toimimalla säästö syntyisi käytännössä höyrynkulutuksen pienentämisestä säätötunneilla. Haasteita ovat kuitenkin markkinoiden 15 minuutin aktivoitumisaikavaade ja muut tekniset haasteet. Sillä joidenkin pumppujen käyttöönotto ja vaihto turbiinipumpuista sähkökäyttöisiin vie aikaa tilanteesta riippuen noin

15–20 minuuttia. Lisäksi pumppujen vaihdot tuhansia kertoja vuodessa saattavat aiheuttaa laitteiden teknistä kulumista ja siten kunnossapitokustannusten kasvua. Tämän lisäksi vaihtaminen takaisin sähköpumpusta turbiinipumppuun vaatii usein sekä operaattorin että kunnossapidon työpanosta. [25] Ilman tarkempaa lisäselvitystä ja riskien arviointia vaikuttaa siis siltä, että höyryturbiinipumppujen hyödyntäminen kysyntäjoustossa ei ole mahdollista.

8 Johtopäätökset

Sähkön kysyntäjoustopon laajalla hyödyntämisellä on useita positiivisia vaikutuksia energiajärjestelmään. Sillä voidaan esimerkiksi joustavasti tasapainottaa sähköverkkoa, varmistaa tuotantokapasiteetin riittävyys eri tilanteissa sekä mahdollisesti pienentää keskimääräisiä tuotantokustannuksia. Kuitenkin Porvoon jalostamolla kysyntäjoustopon osallistuminen järkevällä tavalla on käytännössä haasteellista. Suurimpia syitä tähän ovat jalostamokokonaisuuden monimutkaisuus ja suuri koko sisältäen useita tuhansia sähkölaitteita. Jalostamolla ydinprosessi eli öljynjalostus menee aina tämän hetken markkinoiden korvaustasolla sähkön kysyntäjoustopon edelle, mikä rajaa merkittävästi potentiaalisia joustokohteita. Fingridin kysyntäjoustopomarkkinoille osallistuminen vaatii reservikohteelta muun muassa hyvää säädettävyyttä, nopeaa aktivoitumisvastetta ja suurehkoa tehokapasiteettia. Yleensä eri joustokohteita joudutaan vielä aggregoimaan eli yhdistelemään keskenään, jotta eri markkinapaikkojen minimitarjouskovaatimus saadaan täytettyä.

Porvoon jalostamolla potentiaalisia kysyntäjoustopokohteita on rajallinen määrä, koska joustokohteen ja prosessin välillä täytyy olla riittävä puskuri kuten varastosäiliö, jotta reservikohteen joustaminen ei vaikuta muuhun toimintaan negatiivisesti. Työssä keskityttiin pohjaöljysäiliöiden ja niiden lämmittämiseen käytettävien sähkölämmittimien analysoimiseen ja hyödyntämiseen Fingridin taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla. Pohjaöljysäiliöstä T47 tehtyjen lämpöhäviölaskelmien ja historiadataan pohjautuvan mallin perusteella voi todeta, että uppokuumentimen tehon säätämällä on hyvin hidas vaikutus säiliön pohjaöljyn lämpötilaan jopa silloin, kun säiliön pinta on alarajalla. Hyvän säätövaran lisäksi taajuusohjatun käyttöreservin markkinalla tapahtuva säätö sähköverkon taajuuden funktiona ei myöskään tässä tapauksessa aiheuta laitteiden teknistä kulumista ja normaalitilanteessa jopa markkinalla säädettäessä toteutuva lämmitysteho on melko hyvin ennustettavissa. Markkinalle osallistuminen vaatii kuitenkin investointia muun muassa sähköverkon taajuuden mittalaitteeseen, uusien automaattiosäätöjen tekemistä ja automaattista tiedonvaihtoa Fingridin kanssa. Kysyntäjoustoposta syntyvä säästö on kuitenkin niin merkittävä, että säiliöalueen pohjaöljyketjun sähkölämmittimien liittämiseksi taajuusohjattuun käyttöreserviin vaadittu investointi maksaa itsensä takaisin noin seitsemässä kuukaudessa. Epävarmuutta laskelmiin tosin aiheuttaa tulossa oleva pohjaöljyketjun ajomallien muutos. Lopputuloksena on, että säiliöalueen pohjaöljyketjun lämmittimillä on teknisesti sekä prosessin suhteen mahdollista että taloudellisesti kannattavaa osallistua taajuusohjatun käyttöreservin kysyntäjoustopomarkkinalle.

Investoinnin toteuttamisen ja kysyntäjoustopomarkkinoille osallistumisen jälkeen kysyntäjoustopotoimintaa on mahdollista myös laajentaa lisäämällä uusia joustokohteita jo olemassa olevaan reserviin ja saada lisäkapasiteetilla enemmän säästöjä. Todennäköisesti kapasiteetin lisääminen on myös käytännössä helpompi toteuttaa käyttämällä hyödyksi jo olemassa olevia teknisiä ratkaisuja ja toimintamallia. Potentiaalisia lisäreservikohteita ovat muun muassa jakeluterminaalin pohjaöljyketjun lämmittimet, jotka vastaavat ominaisuuksiltaan hyvin paljon säiliöalueen pohjaöljyketjun lämmittimiä. Todennäköistä on, ettei tämän työn puitteissa kaikkia potentiaalisia jalostamon joustokohteita löydetty, joten jatkossa uusia kohteita voisi etsiä esimerkiksi kartoittamalla jalostamon kaikki yli 100 kW:n nimellistehon omaavat sähkölaitteet ja selvittää niiden säätövara ja ohjattavuus.

Lähdeluettelo

1. **Kumpulainen, L., Rinta-Luoma, J., Voima, S., Kauhaniemi, K., Sirviö, K., Koivisto-Rasmussen, R., Valkama, A., Honkapuro, S., Partanen, J., Lassila, J., Kaipia, T., Haakana, J., Annala, S., Järventausta, P., Valkealahti, S., Repo, S., Verho, P., Suntio, T., Rautiainen, A., Nikander, A., Pakonen, P.** Roadmap 2025. Sähkömarkkina- ja verkkovisio 2035 & Roadmap 2025. [verkkoraportti] [viitattu 14.12.2017] Saatavissa: <http://vaasanseutu.fi/app/uploads/sites/7/2015/02/Loppuraportti.pdf>
2. **Järventausta, P., Repo, S., Trygg, P., Rautiainen, A., Mutanen, A., Lummi, K., Supponen, A., Heljo, J., Sorri, J., Harsia, P., Honkinieni, M., Kallioharju, K., Piikkilä, V., Luoma, J., Partanen, J., Honkapuro, S., Valtonen, P., Tuunanen, J & Belonogova, N.** Kysynnän jousto - Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli):Loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. 2015. 360 s. [viitattu 10.11.2017] ISBN 978-952-15-3485-0. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-3485-0>
3. **Fingrid Oyj.** Kulutuksen ja tuotannon tasapainon eli taajuuden ylläpito. [verkkoaineisto] [viitattu 10.11.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimaj%C3%A4rjestelm%C3%A4nhallinta/kulutuksen%20ja%20tuotannon%20tasapainon%20yll%C3%A4pito/Sivut/default.aspx>
4. **Fingrid Oyj.** Muistio: Perustelut Fingridin yleisissä liittymiseshdoissa (YLE2013) asetetulle 1650 MW tehorajalle. [verkkoaineisto] 2012. [viitattu 1.12.2017]. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/Fingrid%20Oyj%20perustelu%20muutosrajalle%20YLE2013.pdf>
5. **Prof. Samuli Honkapuro.** Kysyntäjousto hyödyttää kaikkia sähkön käyttäjiä ja laskee sähkön hintaa. [verkkoaineisto] 2016. [viitattu 8.11.2017] Saatavissa: <http://www.lahienergia.org/kysyntajousto-hyodyttaa-kaikkia-sahkon-kayttajia-laskee-sahkon-hintaa/>
6. **Fingrid Oyj.** Kysyntäjousto. [verkkoaineisto] [viitattu 8.11.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/Kysyntajousto/Sivut/default.aspx>
7. **Fingrid Oyj.** Tuntihinta-mobiilisovellus. [verkkoaineisto] [viitattu 14.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/tuntihinta-mobiilisovellus/>
8. **Savolainen, I., Similä, L., Syri, S., Ohlström, M.** Teknologiapolut 2050: Teknologian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa, Taustaraportti kansallisen ilmasto- ja energiastrategian laatimista varten. VTT tiedotteita 2432. 2008. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2008/T2432.pdf>
9. **IEA.** About demand response. [verkkoaineisto] [viitattu 8.11.2017] Saatavissa: <https://www.iea.org/topics/electricity/electricitysubtopics/demandresponse/>

10. **CEER.** Advice on Ensuring Market and Regulatory Arrangements help deliver Demand-Side Flexibility. [verkkoaineisto] 2014. [viitattu 8.11.2017] Ref: C14-SDE-40-03 Saatavissa: <https://www.ceer.eu/documents/104400/-/-/3244d854-f6ed-aeb6-9941-6ad22658e799>
11. **Työ- ja elinkeinoministeriö.** Energiatohokkuusdirektiivin toimeenpano. EED-työryhmän loppuraportti. [verkkoaineisto] 2014. [viitattu 9.11.2017] Saatavissa: <https://tem.fi/documents/1410877/2859687/Energiatohokkuusdirektiivin+toimeenpano+21012014.pdf>
12. **CEER.** Jan Panek. Demand Response: A Sustainable Win-Win for All. [verkkoaineisto] 2014. [viitattu 9.11.2017] Saatavissa: <https://www.ceer.eu/documents/104400/-/-/a8688dc2-48b8-2a3f-53f1-dcd2d845bd05>
13. **Ofgem.** Creating the right environment for demand-side response: next steps. [verkkoaineisto] 2013. [viitattu 8.11.2017] Saatavissa: <https://www.ofgem.gov.uk/ofgem-publications/85129/creatingtherightenvironmentfordemandsideresponsenextsteps.pdf>
14. **Fingrid Oyj.** Voimansiirtoverkko. [verkkoaineisto] [viitattu 10.11.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/yhtio/esittely/voimansiirtoverkko/Sivut/default.aspx>
15. **Fingrid Oyj.** Voimajärjestelmän hallinta. [verkkoaineisto] [viitattu 13.11.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimaj%C3%A4rjestelm%C3%A4nhallinta/Sivut/default.aspx>
16. **Neste Oyj.** Porvoo refinery. [verkkoaineisto] [viitattu 22.11.2017] Saatavissa: <https://www.neste.com/en/porvoo-refinery>
17. **Neste Oyj.** Nesteen vuosikertomus 2013 [verkkoaineisto] 2014. [viitattu 9.11.2017] Saatavissa: <https://www.neste.com/fi/fi/konserni/uutiset-media/materiaalit/vuosikertomukset>
18. **Neste Oyj.** Nesteen vuosikertomus 2016. [verkkoaineisto] 2017. [viitattu 9.11.2017] Saatavissa: <https://www.neste.com/fi/fi/konserni/uutiset-media/materiaalit/vuosikertomukset>
19. **Kaukonen H.** Energianhallintajärjestelmien vertailu ja käyttöönotto. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 76 s.
20. **Neste Oyj.** One refinery tactics. [verkkoaineisto] 2015. [viitattu 22.11.2017] Saatavilla: <https://www.neste.com/en/one-refinery-tactics>
21. **Neste Oyj.** Porvoon tuotantolaitosite. [verkkoaineisto] [viitattu 9.11.2017] Saatavissa: <https://www.neste.com/fi/fi/konserni/uutiset-media/materiaalit/esitteet>
22. **Neste Jacobs.** Neste Jacobs will become Neste Engineering Solutions. [verkkoaineisto] [viitattu 15.12.2017] Saatavissa: <https://www.nestejacobs.com/neste-jacobs-will-become-neste-engineering-solutions/>

23. **Salmio H.** Höyryjärjestelmämallin hyödyntäminen tuotannonsuunnittelussa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 69 s.
24. **Google Maps.** [verkkoaineisto] [viitattu 22.11.2017] Saatavissa: <https://www.google.fi/maps/@60.3111949,25.5301409,2272m/data=!3m1!1e3?hl=en>
25. **Neste Oyj.** Salmio H. Sähköpostikeskustelu ja suullinen tiedonanto 18.4.2018.
26. **Tervetuloa Kilpilahteen.** Veolia Services Suomi Oy [verkkoaineisto] [viitattu 22.11.2017] Saatavissa: <https://www.kilpilahti.fi/yritykset-kilpilahdessa/veolia-oy/>
27. **Tervetuloa Kilpilahteen.** Kilpilahden Voimalaitos Oy. [verkkoaineisto] [viitattu 15.12.2017] Saatavissa: <https://www.kilpilahti.fi/yritykset-kilpilahdessa/kilpilahden-voimalaitos-oy/>
28. **Kilpilahti Power Plant Ltd.** Tässä rakennetaan tulevaisuuden voimalaitosta. [verkkoaineisto] [viitattu 15.12.2017] Saatavissa: <https://sites.google.com/kilpilahtipowerplant.com/kilpilahtipowerplant>
29. **Tervetuloa Kilpilahteen.** Aurora Kilpilahti Oy [verkkoaineisto] [viitattu 22.11.2017] Saatavissa: <https://www.kilpilahti.fi/yritykset-kilpilahdessa/aurora-kilpilahti-oy/>
30. **Neste Oyj.** Neste Oil aikoo investoida merkittävästi Suomessa, yhdistää Suomen jalostamoiden toiminnot ja vähentää henkilöstöä. [verkkoaineisto] 2014. [viitattu 23.11.2017] Saatavissa: <https://www.neste.com/fi/fi/neste-oil-aikoo-investoida-merkitt%C3%A4v%C3%A4sti-suomessa-yhdist%C3%A4%C3%A4-suomen-jalostamoiden-toiminnot-ja>
31. **Fingrid Oyj.** Tasepalvelut. [verkkoaineisto] [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/palvelut/tasepalvelut/#tasehallinta>
32. **Fingrid Oyj.** Liite 1 Tasevastuuta ja taseselvitystä koskeva käsikirja. Osa 2: Fingrid Oyj:n yleiset taseselvityksen ehdot. [verkkoaineisto] [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/tasesahkokauppa-ja-taseselvitys/liite-1-osa-2-fingrid-oyjn-yleiset-taseselvityksen-ehdot.pdf>
33. **Jäppinen, J.** Voimajärjestelmän tehotasapainon ylläpito - Vaelluskalafoorumi. [esitys] 2013. [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B3B544D80-D0F7-492A-BC4A-DF59929F0C91%7D/93203>
34. **Fingrid Oyj.** Taseselvitys [verkkoaineisto] [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/palvelut/tasepalvelut/taseselvitys/>
35. **Fingrid Oyj.** Pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt esittävät siirtymistä yhtä aikaa varttitaseeseen vuonna 2020. [verkkoaineisto] [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2017/pohjoismaiset-kantaverkkoyhtiot-esittavat-siirtymista-yhta-aikaa-varttitaseeseen-vuonna-2020/>

36. **Fingrid Oyj.** Sähkömarkkinat korjauksen tarpeessa - mitä voimme tehdä? Palaute & johtopäätökset. [verkkoaineisto] [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: http://www.sahkomarkkinoidentulevaisuus.fi/materials/palaute_ja_johtopaatokset.pdf
37. **Fingrid Oyj.** Tasemallin kuvaus [verkkoaineisto] [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/palvelut/tasepalvelut/tasemallin-kuvaus/>
38. **Fingrid Oyj.** Tuotantotase [verkkoaineisto] [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/palvelut/tasepalvelut/tasemallin-kuvaus/tuotantotase/>
39. **Fingrid Oyj.** Kulutustase [verkkoaineisto] [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/palvelut/tasepalvelut/tasemallin-kuvaus/kulutustase/>
40. **Fingrid Oyj.** Tasepalvelusopimuksen liite 2. [verkkoaineisto] 2017. [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/tasesahkokauppa-ja-taseselvitys/liite-2-maksukomponentit-ja-maksujen-maaraytyminen.pdf>
41. **Fingrid Oyj.** Kaksi- ja yksihinta-järjestelmä. [verkkoaineisto] [viitattu 2.1.2018] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/palvelut/tasepalvelut/tasemallin-kuvaus/kaksi--ja-yksihinta-jarjestelma/>
42. **Lintunen P.** Raportointi ja taseselvitys 1.1.2009 alkaen. Tasepalveluseminaari [esitys] 2008. [viitattu 2.1.2018] Saatavissa: <http://docplayer.fi/16162538-Raportointi-ja-taseselvitys-1-1-2009-alkaen.html>
43. **Fingrid Oyj.** Reservit ja säätösähkö. Kustannusten kattaminen [verkkoaineisto] [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#kustannusten-kattaminen>
44. **Fingrid Oyj.** Tasepalveluun sisältyvät reservikustannukset [verkkoaineisto] [viitattu 19.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/palvelut/tasepalvelut/tasemallin-kuvaus/tasepalveluun-sisaltyvat-reservikustannukset/>
45. **Rautiainen, A., Koskela, J., Vilppo, O., Supponen, A., Kojo, M., Toivanen, P., Rinne, E. & Jarventausta, P.** Attractiveness of demand response in the Nordic electricity market - Present state and future prospects. IEEE Computer Society. 2017. Saatavissa: DOI 10.1109/EEM.2017.7981925
46. **Energiateollisuus.** Sähköpörssin ammattisanasto. [verkkoaineisto] [viitattu 13.11.2017] Saatavissa: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/sahkoporssin_ammattisanasto.html#material-view
47. **Elinkeinoelämän keskusliitto.** Linna J. & Nuutinen J. Energiaopas pienille ja keskisuurille yrityksille. [verkkoaineisto] 2012. [viitattu 13.11.2017] Saatavissa: <https://ek.fi/wp-content/uploads/energiaopas.pdf>

48. **Energiateollisuus.** Tukkumarkkinaa yli Euroopan. [verkkoaineisto] [viitattu 13.11.2017] Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiamarkkinat/sahkomarkkinat/tukkumarkkinat
49. **Nord Pool AS.** Bidding areas. [verkkoaineisto] [viitattu 12.12.2017] Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/Bidding-areas/>
50. **Nord Pool AS.** Day-ahead market. [verkkoaineisto] [viitattu 13.11.2017] Saatavissa: <http://www.nordpoolspot.com/the-power-market/Day-ahead-market/>
51. **Nord Pool AS.** Product Specification Nordic, Baltic and German market areas. [verkkoaineisto] 2017. [viitattu 12.12.2017] Saatavissa: https://www.nordpoolspot.com/globalassets/download-center/rules-and-regulations/product-specifications-nordic-baltic-and-german-market_valid-from-3-july-2017.pdf
52. **Nord Pool AS.** About Us. [verkkoaineisto] [viitattu 13.11.2017] Saatavissa: <http://www.nordpoolspot.com/About-us/>
53. **Fingrid Oyj.** Suomen kysyntäjousto. [verkkoaineisto] [viitattu 3.1.2018] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/>
54. **Nord Pool AS.** Day-ahead Trading Price Calculation. [verkkoaineisto] [viitattu 12.12.2017] Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/TAS/Day-ahead-trading/Price-calculation/>
55. **Nord Pool AS.** Day-ahead prices. [verkkoaineisto] [viitattu 12.12.2017] Saatavissa: <https://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/ALL1/Monthly/?view=table>
56. **Nord Pool AS.** Intraday Market. [verkkoaineisto] [viitattu 13.11.2017] Saatavissa: <http://www.nordpoolspot.com/the-power-market/Intraday-market/>
57. **Nord Pool AS.** Intraday Statistics [verkkoaineisto] [viitattu 3.1.2018] Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Intraday/Market-data1/>
58. **SOK.** S-ryhmän kysyntäjoustoprojekti "HertSi". Loppuraportti. [verkkoaineisto] [viitattu 5.1.2018] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/kysyntajoustoprojekti-s-ryhmassa-loppuraportti.pdf>
59. **Nord Pool AS.** Financial market. [verkkoaineisto] [viitattu 13.11.2017] Saatavissa: <http://www.nordpoolspot.com/the-power-market/Financial-market/>
60. **Fingrid Oyj.** Reservit. [verkkoaineisto] [viitattu 7.11.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/Sivut/default.aspx>

61. **Fingrid Oyj.** Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. [verkkoaineisto] 2017. [viitattu 1.12.2017] Saatavissa:
<http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/markkinaliitteet/Reservit/Reservituotteet.pdf>
62. **Fingrid Oyj.** Reservilajit. [verkkoaineisto] [viitattu 1.12.2017] Saatavissa:
<http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservilajit/Sivut/default.aspx>
63. **Fingrid Oyj.** Taajuusohjattujen reservien ylläpidon sovellusohje. [verkkoaineisto] 2018. [viitattu 4.1.2018] Saatavissa:
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite220-20taajuusohjattujen20reservien20yllapidon20sovellusohje202018.pdf>
64. **Fingrid Oyj.** Reservien hankinta. [verkkoaineisto] [viitattu 7.12.2017] Saatavissa:
http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservien_hankinta/Sivut/default.aspx
65. **Fingrid Oyj.** Kuinka osallistua reservimarkkinoille. [verkkoaineisto] [viitattu 4.12.2017] Saatavissa:
http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/Tarvittavat_sopimukset/Sivut/default.aspx
66. **Fingrid Oyj.** Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi. [verkkoaineisto] [viitattu 4.12.2017] Saatavissa:
http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservien_hankinta/taajuusohjattu_kaytto_ja_hairioreservi/Sivut/default.aspx
67. **Fingrid Oyj.** Taajuusohjattujen reservien tuntimarkkinoiden säännöt ja maksut. [verkkoaineisto] 2018. [viitattu 14.2.2018] Saatavissa:
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/taajuusohjattujen-reservien-yllapidon-tuntimarkkinoiden-saannot-ja-maksut-1.1.2018-alkaen.pdf>
68. **Fingrid Oyj.** Taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin vuosisopimus nro xx/2018 [verkkoaineisto] [viitattu 19.12.2017] Saatavissa:
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/taajuusohjatun-kaytto-ja-hairioreservien-vuosisopimus-2018.pdf>
69. **Fingrid Oyj.** Kuivaniemi, M. Sähköpostikeskustelu 5.3.2018.
70. **Fingrid Oyj.** Toteutuneet tuntikaupat, taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) [verkkoaineisto] [viitattu 19.12.2017] Saatavissa:
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/reservimarkkinainformaatio/toteutuneet-tuntikaupat-taajuusohjattu-kayttoreservi-fcr-n/>
71. **Fingrid Oyj.** Vuosimarkkinat [verkkoaineisto] [viitattu 19.12.2017] Saatavissa:
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/reservimarkkinainformaatio/vuosimarkkinat/>

72. **Seam Group Oy.** Pakkasvaraston hyödyntäminen taajuusohjatuksi käyttöreserviksi. Pilottiprojektin loppuraportti. [verkkoaineisto] [viitattu 4.1.2018] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/loppuraportti-julkinnen.pdf>
73. **Pöyry Management Consulting.** Sähkön kysyntäjoustopotentiaalin kartoitus Suomessa [verkkoaineisto] 2014. [viitattu 4.1.2018] Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/fingrid_julkinen_raportti_kysyntajousto_16062014.pdf
74. **Fingrid Oyj.** Toteutuneet tuntikaupat, taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D) [verkkoaineisto] [viitattu 19.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/reservimarkkinainformaatio/toteutuneet-tuntikaupat-taajuusohjattu-hairioreservi-fcr-d/>
75. **Fingrid Oyj.** Häiriöreservi auttaa poikkeustilanteissa. [verkkoaineisto] [viitattu 5.1.2018] Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/hairioreservi-auttaa-poikkeustilanteissa/>
76. **There Corporation Oy.** Kysynnänjouston pilottiprojekti. Loppuraportti. [verkkoaineisto] 2016. [viitattu 5.1.2018] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/kysynnänjouston-pilottiprojekti-loppuraportti-julkinen.pdf>
77. **Fingrid Oyj:n lehti.** Numero 3/2015. Varavoimageneraattorit saivat lisätöitä kysyntäjousta. [verkkoaineisto] [viitattu 5.1.2018] Saatavissa: <http://view.24mags.com/mobilev/5799fb47bab816ccfed4f4c098d56be1#/page=14>
78. **Fingrid Oyj.** Automaattisen taajuudenhallintareservin sovellusohje. [verkkoaineisto] 2016. [viitattu 5.12.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimajarjestelmaliitteet/Reservit/2016/Liite%201%20-%20Automaattisen%20taajuudenhallintareservin%20sovellusohje.pdf>
79. **Vänskä, V** 2017. aFRR markkinat nyt ja tulevaisuudessa - Reservipäivät 17-18.5.2017 [esitys] 2017. [viitattu 5.12.2017] Saatavissa: <https://www.slideshare.net/Fingrid/reservipivt-2017-automaattinen-taajuudenhallintareservi-a-frr-nyt-ja-tulevaisuudessa-id-52496>
80. **Fingrid Oyj.** Automaattisen taajuudenhallintareservin tuntimarkkinasopimus nro xx/2016. [verkkoaineisto] [viitattu 13.4.2018] Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/afrr20sopimus2016_pohja.pdf
81. **Fingrid Oyj.** Automaattisen taajuudenhallintareservin ylössäätökapasiteetin hinta [verkkoaineisto] [viitattu 19.12.2017] Saatavissa: <https://data.fingrid.fi/dataset/procured-a-frr-capacity-price-up>

82. **Fingrid Oyj.** Automaattisen taajuudenhallintareservin alassäätökapasiteetin hinta [verkkoaineisto] [viitattu 19.12.2017] Saatavissa: <https://data.fingrid.fi/dataset/procured-afr-capacity-price-down>
83. **Fingrid Oyj.** Säättösähkömarkkinat. [verkkoaineisto] [viitattu 8.12.2017] Saatavissa: http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservien_hankinta/saatosahkomarkkinat/Sivut/default.aspx
84. **Fingrid Oyj.** Säättösähkömarkkinasopimus [verkkoaineisto] [viitattu 7.12.2017] Saatavissa: http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimajarjestelmaliitteet/Reservit/2015/S%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s%C3%A4hk%C3%B6markkinasopimus%202015_POHJA.pdf
85. **Fingrid Oyj.** Säättösähkömarkkinasopimus Liite 1. Säättösähkömarkkinoiden säännöt [verkkoaineisto] [viitattu 7.12.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/markkinaliitteet/Saatosahko/S%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s%C3%A4hk%C3%B6markkinasopimus%20Liite%201.%20%20S%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s%C3%A4hk%C3%B6markkinat.pdf>
86. **Fingrid Oyj.** Säättösähkön hinta [verkkoaineisto] [viitattu 19.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/reservimarkkinainformaatio/saatosahkon-hinta/>
87. **Enegia.** Varavoimakoneiden hyödyntäminen taajuusohjattuna häiriöreservinä ja säättösähkömarkkinoilla. Pilottiprojektin loppuraportti - julkinen versio. [verkkoaineisto] [viitattu 8.1.2018] Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/vv_pilotti_raportti_enegia_05_2015_julkinen_versio.pdf
88. **Fingrid Oyj.** Siirtorajat [verkkoaineisto] [viitattu 7.12.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimaj%C3%A4rjestelm%C3%A4nhallinta/siirtojen%20hallinta/siirtorajat/Sivut/default.aspx>
89. **Fingrid Oyj.** Säättökapasiteettimarkkinat. [verkkoaineisto] [viitattu 7.12.2017] Saatavissa: http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservien_hankinta/saatokapasiteetti/Sivut/default.aspx
90. **Fingrid Oyj.** Säättökapasiteettimarkkinasopimus. [verkkoaineisto] [viitattu 8.12.2017] Saatavissa: http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimajarjestelmaliitteet/Reservit/2016/S%C3%A4%C3%A4t%C3%B6kapasiteettimarkkinasopimus%202016_POHJA.pdf
91. **Fingrid Oyj.** Säättökapasiteettimarkkinat. Toteutunut hankinta. [verkkoaineisto] [viitattu 8.12.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/saatosahko/saatokapasiteettim/Toteutunuthankinta/Sivut/default.aspx>

92. **Fingrid Oyj.** Tehoreservipalvelu. [verkkoaineisto] [viitattu 8.12.2017] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/tehoreservi/Sivut/default.aspx>
93. **Energiavirasto.** Tehoreservijärjestelmä [verkkoaineisto] [viitattu 8.12.2017] Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/tehoreservijarjestelma>
94. **Fingrid Oyj.** Säännöt tehoreservijärjestelmään kuuluvien sähkönkulutuksen joustoon kykenevien kohteiden käyttövalmiuden ylläpidolle, niiden käytölle sekä sähkönkulutuksen tarjoamiseen markkinoille. [verkkoaineisto] 2015. [viitattu 8.12.2017] Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Fingrid+Tehoreservin+k%C3%A4ytt%C3%B6s%C3%A4%C3%A4nn%C3%B6t+2015+kulutus.pdf/a2acc5d7-9442-472b-9d9a-f11d3523bf93>
95. **Fingrid Oyj.** Markkinapaikat [verkkoaineisto] [viitattu 11.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/markkinapaikat/>
96. **Fingrid Oyj.** Reservimarkkinainformaatio [verkkoaineisto] [viitattu 12.12.2017] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/reservimarkkinainformaatio/>
97. **Neste Oyj.** Toiminnankuvaus (sisäinen). Pohjaöljyketjun kuvaus. 17.1.2018.
98. **Neste Oyj.** OQD-1918. Bitumisäiliöiden operointiohje. 16.1.2009. (sisäinen)
99. **Neste Oyj.** Hankintamäärittely. Bitumin varastosäiliöt T47, T48, T49 säiliöiden sähkölämmittimet. 1.5.1987 (sisäinen)
100. **Neste Oyj.** Valmistuksen operaattoreiden haastattelu 5.2.2017.
101. **Neste Oyj.** Yrityksen sisäinen levyasema. (sisäinen)
102. **Neste Oyj.** Tuomala O. & Tankka A. Sähköpostikeskustelu 23.1.2018.
103. **Neste Oyj.** Ronkainen J. Kirjallinen tiedonanto 20.4.2018.
104. **Neste Oyj.** Käyttöohje sähkölämmönvaihtimien TS3-TS5 tehonsäätöön toteutettuna Solcon Industries Ltd:n tyristorisäätimellä TPS. 2006. (sisäinen)
105. **Fingrid Oyj.** Jäppinen J., Kuivaniemi M. Suullinen tiedonanto 2.2.2018.
106. **Neste Oyj.** Säiliö T-47 säiliöluonnos. Piirustusnumero NP3-20550. (sisäinen)
107. **Neste Oyj.** Tank Specification. Puhalletun bitumin varastosäiliö T-47. Piirustusnumero NP3-20454. (sisäinen)
108. **Neste Oyj.** BIT ja BIP säiliöt. Säiliöiden eristys. Piirustusnumero NP1-17146. (sisäinen)

109. **The Engineering Toolbox.** Emissivity Coefficients of some common Materials. [verkkoaineisto] [viitattu 6.3.2018] Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html
110. **Tungkin Industry Co. Ltd.** Low Thermal Conductivity Rockwool Insulation Board, Mineral Wool Slabs OEM. [verkkoaineisto] [viitattu 19.2.2018] Saatavissa: <http://www.rock-wool-insulation.com/sale-1524458-low-thermal-conductivity-rockwool-insulation-board-mineral-wool-slabs-oem.html>
111. **The Engineering Toolbox.** Thermal Conductivity of Metals. [verkkoaineisto] [viitattu 19.2.2018] Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html
112. **The Engineering Toolbox.** Densities of Solids. [verkkoaineisto] [viitattu 19.2.2018] Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/density-solids-d_1265.html
113. **The Engineering Toolbox.** Specific Heats for Metals. [verkkoaineisto] [viitattu 19.2.2018] Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metals-d_152.html
114. **Rockwool.** Rockwool Cladding Roll. [verkkoaineisto] [viitattu 19.2.2018] Saatavissa: <http://www.rockwool.co.uk/products/rockwool-cladding-roll/>
115. **The Engineering Toolbox.** Plastics - Thermal Conductivity Coefficients. [verkkoaineisto] [viitattu 19.2.2018] Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-plastics-d_1786.html
116. **The Engineering Toolbox.** Polymers - Specific Heats. [verkkoaineisto] [viitattu 19.2.2018] Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-polymers-d_1862.html
117. **The Engineering Toolbox.** Nitrogen - Specific Heat. [verkkoaineisto] [viitattu 13.3.2018] Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/nitrogen-d_977.html
118. **Wischnewski B. & Wagner R.** Peace Software. [verkkoaineisto] [viitattu 13.3.2018] Saatavissa: http://www.peacesoftware.de/einigewerte/stickstoff_e.html
119. **The Engineering Toolbox.** Convective Heat Transfer. [verkkoaineisto] [viitattu 7.3.2018] Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html
120. **Bergman T., Lavine S., Incropera F., Dewitt P.** Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th. ed. John Wiley & Sons, 2011. 980 s. ISBN 978-0470-50197-9
121. **Raiko R., Kurki-Suonio I., Saastamoinen J., Hupa M.** Poltto ja palaminen. Teknillisten Tieteiden Akatemia, 1995. 629 s. ISBN 951-666-448-2

122. **Ympäristöministeriö.** Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. [verkkoaineisto] 2017. [viitattu 7.3.2018] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010#Pidp452226448>
123. **Ympäristöministeriö.** Suomen rakentamismääräyskokoelma. Energiatehokkuus. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. [verkkoaineisto] 2018. [viitattu 7.3.2018] Saatavissa: <http://www.ymp.fi/download/noname/%7B8C5C3B41-E127-4889-95B0-285E9223DEE6%7D/40468>
124. **Wikipedia.** Spherical cap. [verkkoaineisto] [viitattu 7.3.2018] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_cap
125. **Fluke.** Fluke 381 Remote Display True-rms AC/DC Clamp Meter with iFlex™. [verkkoaineisto] [viitattu 7.3.2018] Saatavissa: <http://www.fluke.com/fluke/m2en/clamp-meters/fluke-381.htm?pid=70413>
126. **Fluke.** What is true-rms. [verkkoaineisto] [viitattu 8.3.2018] Saatavissa: <http://en-us.fluke.com/training/training-library/measurements/electricity/what-is-true-rms.html>
127. **The Engineering Toolbox.** Three-Phase Power Equations. [verkkoaineisto] [viitattu 8.3.2018] Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/three-phase-electrical-d_888.html
128. **C-Therm.** Thermal Resistance & Thermal Conductance. [verkkoaineisto] [viitattu 13.3.2018] Saatavissa: http://ctherm.com/products/tci_thermal_conductivity/helpful_links_tools/thermal_resistance_thermal_conductance/
129. **Emerson.** Rosemount 644 Temperature Transmitter. Product Data Sheet January 2017 [verkkoaineisto] [viitattu 21.3.2018] Saatavissa: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00813-0100-4728.pdf>
130. **Fingrid Oyj.** Avoin data. Taajuusohjattu käyttöreservi, hinnat. [verkkoaineisto] [viitattu 29.3.2018] Saatavissa: <https://data.fingrid.fi/dataset/frequency-containment-reserve-for-normal-operation-prices>
131. **Fingrid Oyj.** Avoin data. Taajuusohjattu käyttöreservi, määrät [verkkoaineisto] [viitattu 29.3.2018] Saatavissa: <https://data.fingrid.fi/dataset/frequency-containment-reserves-for-normal-operation-volumes>
132. **Fingrid Oyj.** Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-N ja FCR-D), vuosimarkkinahankinta ja toteutuneet tuntikaupat. [verkkoaineisto] [viitattu 29.3.2018] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/reservimarkkinainformaatio/Taajuusohjattu-kaytto-ja-hairioreservi-vuosimarkkinahankinta-ja-toteutuneet-tuntikaupat/>
133. **Fingrid Oyj.** Tehotasapaino [verkkoaineisto] [viitattu 2.4.2018] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/tehotasapaino/>

134. **Fingrid Oyj.** Avoin data. Taajuus - historiatieto [verkkoaineisto] [viitattu 19.4.2018]
Saatavissa: <https://data.fingrid.fi/dataset/frequency-historical-data>
135. **Neste Oyj.** Kiuru M. Suullinen tiedonanto 6.4.2018.
136. **Neste Oyj.** OQD-2712. Muutosten hallinta 1.11.2010 (sisäinen)
137. **Hakala J.** EDI - Electronical Data Interchange / OVT - Organisaatioiden välinen tiedonsiirto. Tiivistelmä. [verkkoaineisto] [viitattu 9.4.2018] Saatavissa:
<http://www.tml.tkk.fi/Studies/Tik-110.300/1998/Essays/edi.html>
138. **Fingrid Oyj.** Kuivaniemi M. Sähköpostikeskustelu 19.3.2018.
139. **Neste Engineering Solutions.** Hagman J. Sähköpostikeskustelu 16.4.2018.
140. **Neste Oyj.** Makkonen T. Sähköpostikeskustelu ja suullinen tiedonanto 9.4.2018.

Liiteluettelo

Liite 1. Kysyntäjouaston markkinapaikat. 1 sivu.

Liite 1. Kysyntäjouston markkinapaikat

